

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA STAVEBNÍCH HMOT A DIAGNOSTIKY STAVEB

Síranová koroze betonu

Sulfate corrosion of concrete

Student:

Bc. Lukáš Lajčík

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Mec

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Lukáš Lajčák

Studijní program:

N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor:

3607T021 Stavební hmoty a diagnostika staveb

Téma:

Síranová koroze betonu
Sulfate corrosion of concrete

Zásady pro vypracování:

Na předem připravených vzorcích betonu o známém složení bude studována koroze vlivem vnějšího působení síranů. Zkoušeny budou betony standardního složení, betony odolné síranové korozi a také vysokohodnotný beton. Zkoumán bude vliv síranové koroze na standardní vlastnosti betonu. Dále bude zkoumána hloubka působení síranů v čase a vznik síranových struktur v betonové matici. Vzorky budou analyzovány chemicky a také instrumentálními metodami.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Witzany, J. a kol.: PDR - Poruchy, degradace a rekonstrukce, Praha: Nakladatelství ČVUT, 2010.
- [2] Marchand, J., Odler, I., Skalný, J. : Sulfate attack on concrete, CRC Press, 2001.
- [3] ČSN EN 196-2. Metody zkoušení cementu - Část 2: Chemický rozbor cementu. Praha : Český normalizační institut, 2005.
- [4] ČSN EN 1744-1. Zkoušení chemických vlastností kameniva - Část 1: Chemický rozbor, Praha: Český normalizační institut 2013.
- [5] ČSN 72 0117. Základní postup rozboru silikátů - Stanovení síranové síry vázkovou metodou, Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [6] ČSN 72 0118. Základní postup rozboru silikátů - Stanovení celkové síry vázkovou metodou, Praha: Český normalizační institut, 2009.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


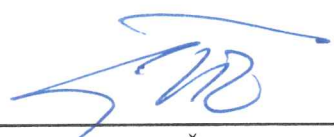
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Mec**

Datum zadání: 28.02.2015

Datum odevzdání: 30.11.2015



Ing. Libor Židek
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá vlivem síranové koroze na vlastnosti beton. Pro potřeby práce bylo vytvořeno 5 záměsí betonu. Byly určeny základní mechanické a fyzikální vlastnosti připravených betonů. Zkušební vzorky připravené z těchto záměsí byly vystaveny agresivnímu prostředí bohatému na sírany. Agresivní prostředí bylo vytvořeno zředěním kyseliny sírové a to tak, aby jejich množství odpovídalo požadavkům normy ČSN EN 206. Na vzorcích vystavených agresivnímu prostředí byla poté provedena chemická analýza a byly sledovány změny vyvolané síranovou korozí. Také byly stanoveny mechanické vlastnosti betonu degradovaného síranovou korozí.

Klíčová slova: Síranová koroze, beton

Annotation:

This thesis examines the influence of sulfate corrosion on the properties of concrete. For the purposes of this thesis was created five concrete mixtures. They were determined basic mechanical and physical properties of the prepared concrete. The samples prepared from a batch of these were exposed to aggressive environments rich on sulfates. Aggressive environment was created by diluting sulfuric acid so that the amount corresponds to requirements of standard EN 206. The samples exposed to aggressive environments was then chemically analyzed and were monitored for changes due to sulfuric acid corrosion. Also, the mechanical properties were determined on concrete degraded with sulfate corrosion.

Keywords: Sulfate corrosion, concrete

Obsah

Seznam zkratk	8
Obsah.....	6
1 Úvod.....	9
2 Síranová koroze betonu	10
2.1 Vnitřní síranová koroze	11
2.2 Vnější síranová koroze	11
2.3 Vnější síranová koroze působením kyseliny sírové	13
2.4 Předcházení síranové korozi betonu	15
3 Teoretická část.....	15
3.1 Návrh složení betonu	16
3.2 Kamenivo.....	18
3.3 Zdánlivá pórovitost.....	18
3.4 Zdánlivá hustota	18
3.5 Pevnost v tlaku.....	19
3.6 Modul pružnosti.....	20
3.7 Stanovení měrné hmotnosti	21
3.8 Stanovení skutečné pórovitosti	22
4 Experimentální část.....	22
4.1 Zkoušky provedené na referenčních vzorcích	22
4.1.1 Stanovení objemové hmotnosti gravimetricky.....	23
4.1.2 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením.....	24
4.1.3 Stanovení zdánlivé pórovitosti	27
4.1.4 Stanovení zdánlivé hustoty.....	29
4.1.5 Stanovení nasákavosti	30
4.1.6 Stanovení pevnosti v tlaku	32

4.1.7	Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou	34
4.1.8	Stanovení měrné hmotnosti	38
4.1.9	Stanovení skutečné pórovitosti.....	39
4.2	Síranová koroze	40
4.2.1	Chemické složení betonu degradovaného síranovou korozí	44
4.2.2	Síranová koroze cementové pasty	55
4.2.2.1	Termální analýza vzorků cementové pasty vystavených síranové korozi ..	55
4.2.2.2	Analýza vzorků cementové pasty napadené síranovou korozí pomocí XRF spektrometrie	61
4.2.2.3	Maximální možný příjem SO_4^{2-} iontů cementových past	63
4.2.3	Vliv síranové koroze na dynamický modul pevnosti betonu	66
4.2.4	Vliv síranové koroze na pevnost betonu v tlaku	69
5	Závěr.....	72
6	Poděkování	73
7	Literatura:	74
8	Seznam tabulek:	76
9	Seznam obrázků:	76
10	Seznam příloh:.....	79

Seznam zkratek:

a, b, c ...	rozměr strany krychle	[mm]
A ...	zatěžovací plocha	[m ²]
d ...	průměr válcového vzorku	[mm]
f_c ...	pevnost betonu v tlaku	[MPa]
E_{BU} ...	dynamický modul pružnosti	[GPa]
F ...	síla	[kN]
k ...	součinitel rovnoměrnosti prostředí	[-]
m ...	hmotnost	[g, kg]
m_n ...	hmotnost nasáklého vzorku	[g, kg]
m_{nw} ...	hmotnost vzorku váženého pod vodou	[g, kg]
m_n ...	hmotnost nasáklého vzorku	[g, kg]
m_w ...	hmotnost vody	[g, kg]
n ...	nasákavost	[%]
OH ...	objemová hmotnost	[kg .m ⁻³]
PS ...	skutečná pórovitost	[%]
PZ ...	zdánlivá pórovitost	[%]
p ...	pórovitost	[%]
v_L ...	rychlost ultrazvukového vlnění	[m.s ⁻¹]
V ...	objem	[m ³]
ZH ...	zdánlivá hustota	[kg .m ⁻³]
ρ ...	měrná hmotnost	[kg .m ⁻³]
ρ_w ...	objemová hmotnost vody	[kg .m ⁻³]
XRFS...	rentgenová fluorescenční spektrometrie	

1 Úvod

Beton je považován za kompozitní materiál. Skládá se z plniva, pojiva, vody, popřípadě dalších příměsí a přísad. Jako pojivo bývá nejčastěji používán cement, jako plnivo kamenivo. Ve stavebnictví patří beton v dnešní době k nejpoužívanějším stavebním materiálům [13].

Při provádění betonových konstrukcí je velice důležité brát zřetel na mechanické vlastnosti betonu, zejména pak na pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti, jakožto hlavní parametry pro plnění nosné funkce. Ovšem také je nutné sledovat trvanlivost a odolnost betonu. Betonové konstrukce mohou být vystaveny různému agresivnímu prostředí. Jedním z těchto agresivních prostředí je i prostředí bohaté na sírany. V takovémto prostředí dochází k degradaci betonu, dochází k odlupování povrchu konstrukcí a rozkladu cementového tmele, což vede k narušení betonových konstrukcí, snižování jejich únosnosti, případně při dlouhodobém vystavení konstrukcí tomuto prostředí, až k jejich úplné destrukci.

Agresivnímu prostředí bohatému na sírany jsou vystaveny konstrukce, které jsou v kontaktu s odpadními vodami z kanalizace nebo průmyslových výroben, které často sírany obsahují. Dalším častým zdrojem síranů jsou v některých oblastech kyselé deště, které vznikají díky spalování fosilních paliv s obsahem síry a nedostatečnému odsíření unikajících spalin do atmosféry.

Práce se zaměřuje na sledování vlivu síranové koroze na připravené betony. Na části betonových zkušebních těles připravených podle navržených receptur byly zjištěny jejich mechanické a fyzikální vlastnosti. Další část zkušebních těles byla vystavena agresivnímu prostředí bohatému na sírany. V tomto prostředí byly vzorky určitou dobu ponechány a podrobeny chemickému rozboru ke zjištění změn, které proběhly v betonech při vystavení síranové korozi.

Agresivní prostředí bylo vytvořeno přidáním kyseliny sírové do vody a to v takovém množství, které odpovídá požadavkům normy ČSN EN 206 na množství síranových iontů SO₄²⁻ pro třídy agresivního prostředí XA1 – XA3.

Práce se zaměřuje na sledování vlivu síranové koroze na betony běžných tříd, nikoliv na speciální druhy betonů, jako například ultravysokopevnostní betony, těžké betony, lehké betony a další.

2 Síranová koroze betonu

Síranovou korozi betonu lze popsat řadou chemických reakcí mezi síranovými ionty a komponenty ztvrdlého betonu, zejména cementové kaše, způsobené vystavením konkrétním síranům a vlhkosti. Síraný jsou potenciálně nejvíce škodlivé, pokud jsou přítomny v plynné nebo kapalné formě. Procesy síranové koroze jsou nezávislé na zdroji síranů, protože tyto procesy se řídí stejnými fyzikálně – chemickými procesy. Rozdíly v důsledcích síranové koroze, vyvolané jakýmkoliv zdrojem síranů, závisí pouze na fyzických podmínkách, při kterých tyto reakce probíhají [1].

Síranovou korozi způsobuje expanzivní charakter ettringitu, k jehož tvorbě dochází působením vnitřních síranů (vyskytujících se v betonu), nebo vnějších síranů. Vnější síraný pronikly do betonu z okolního prostředí. Tyto síraný reagují s hydratovanými kalciumalumináty z hydratované cementové pasty [2].

Při tvorbě ettringitu nemusí nutně dojít k porušení betonu, pokud k ní dochází stejnoměrně a bezprostředně po namíchání betonu. To znamená v řádu hodin, maximálně dní, buď ještě v čerstvém betonu, nebo v ještě plastickém betonu. Tento proces se nazývá raná tvorba ettringitu a nevyvolává žádné výrazné porušení. K tvorbě ettringitu dochází vlivem mletého sádrovce, který se přidává do cementu jako regulátor tuhnutí. Tento sádrovec reaguje s bezvodými kalciumalumináty během několika hodin po smíchání cementu s vodou. Reakcí dochází k regulaci tuhnutí. K další tvorbě ettringitu může docházet v průběhu několika dní od namíchání při hydrataci C_4A_3S . Při tomto procesu dochází k buzení relativně malých, homogenních napětí. Tato napětí jsou užitečná například u expanzivních cementů [2].

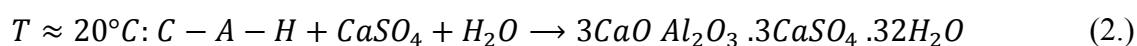
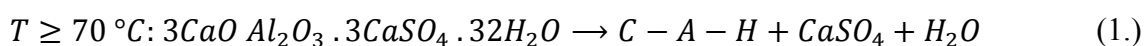
Ovšem pokud k tvorbě ettringitu dochází později heterogenně (po měsících, rocích), způsobuje dodatečná tvorba ettringitu lokalizovanou expanzi ve ztvrdlém betonu. Dochází ke vzniku trhlinek, odlupování kousků betonu a ke ztrátě pevnosti. Síranovou korozi tedy rozumíme opožděnou tvorbu ettringitu [2].

Rozeznáváme dva typy síranové koroze, které se liší podle zdroje síranů. Jedná se o vnější nebo vnitřní síranovou korozi. K vnější síranové korozi dochází vlivem působení síranů z vnějšího prostředí (vody nebo zeminy), které pronikají do betonových konstrukcí. Vnitřní síranová koroze nastane působením síranů, které můžou být dodatečně uvolňovány z kameniva kontaminovaného sádrovcem, nebo jako důsledek teplotního rozkladu ettringitu [2].

Ke vzniku síranové koroze dojde, pokud je beton vystaven prostředí bohatému na sírany, a přítomnosti vody. Dále má na síranovou korozi vliv kapilární pórovitost nebo mikrotrhliny v betonu.

2.1 Vnitřní síranová koroze

K vnitřní síranové korozi dochází, pokud se beton nachází v prostředí bez síranů, ale obsahuje v sobě zdroj síranů. Zdrojem síranů může být například kamenivo, které je kontaminováno sádrovcem. Tyto sírany se mohou dodatečně uvolňovat. Další možností je ošetřování betonu při teplotě vyšší než 70 °C, kdy dochází k rozložení primárního ettringitu na sekundární ettringit [2]:

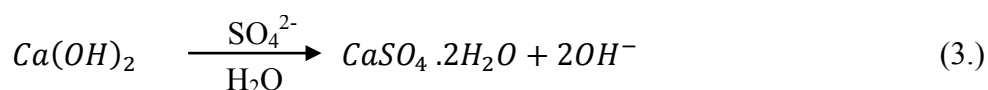


Ošetřování za vysoké teploty se provádí například při propařování předpínaných dílců nebo při vzrůstu teploty při betonáži masivních konstrukcí. Aby k tomuto typu koroze nedošlo, nesmí být tedy beton při tuhnutí a tvrdnutí vystaven teplotě vyšší než 70 °C [2].

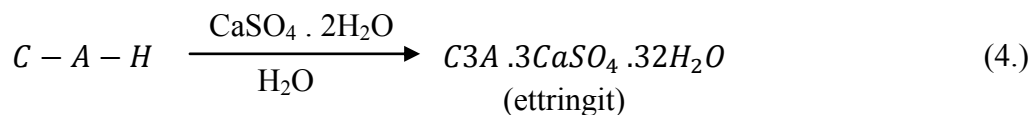
2.2 Vnější síranová koroze

Při síranové korozi betonu způsobené vnějšími sírany dochází k poškození betonu. Dochází k nadměrné expanzi, drolení povrchu betonu, který byl v kontaktu se sírany, ke vzniku trhlin, delaminaci betonu a ke ztrátě pevnosti [1].

První fáze nastává působením síranových iontů SO_4^{2-} z vnějšího prostředí, čímž dochází k přeměně portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na sádrovec:

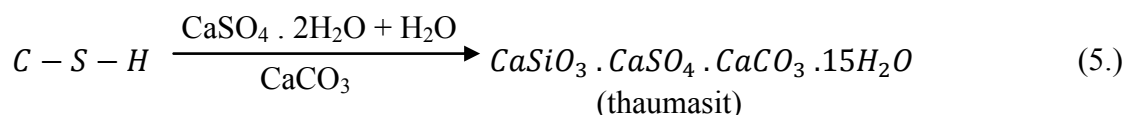


Již při tomto procesu dochází k růstu objemu výsledných produktů, jelikož sádrovec má nižší hustotu než portlandit. K další, ovšem výraznější, objemové změně dochází při dalším procesu, kdy z kalcium-aluminát-hydrátu (C-A-H) vzniká ettringit:



Tento typ ettringitu se nazývá sekundární ettringit. Objemové změny, které nastávají při tvorbě sekundárního ettringitu mají za následek poškození betonu. Na rozdíl od toho tvorba primárního ettringitu nastává v betonu v plastickém stavu, proto nemá škodlivé následky. Primární ettringit v betonu reguluje tuhnutí [2].

V chladnějším prostředí, při teplotách 0 – 15 °C, může v některých případech dojít k tvorbě thaumasitu namísto ettringitu.



C-S-H gel, ze kterého thaumasit vzniká, tvoří základní pojivovou fázi ztvrdlého cementového tmele. Proto je vznik thaumasitu rozkladem C-S-H gelu horší, než tvorba ettringitu [2].

Nejběžnějším zdrojem síranů jsou podzemní vody. Zde se sírany vyskytují nejčastěji v kombinaci s kationty alkalických kovů nebo kationty vápníku. V některých vodách může být přítomné i významné množství Mg^{2+} iontů. Dále mohou podzemní vody obsahovat i sírany ve formě síranu amonného, který se do vody mohl dostat při použití jako hnojivo. Ve vodě může být obsažena také volná kyselina sírová. Škody, které způsobí agresivní podzemní voda na betonu, nezávisí jen na koncentraci síranových iontů ve vodě, ale i na propustnosti půdy přiléhající k betonu a na množství vody, které se dostane do kontaktu s betonovým povrchem [1].

Kromě podzemní vody mohou sloužit jako zdroj síranů i vody řek a jezer, které mohou také vést k vnější síranové korozi. Složení těchto vod se pohybuje ve většině případů v podobném rozmezí jako u podzemní vody. Poškození betonu vlivem síranové koroze závisí na koncentraci rozpuštěných síranových iontů ve vodě, nebo na tom, zda se jedná o stojatou nebo tekoucí vodu. A v případě tekoucí vody také na rychlosti proudění [1].

Zvláštním případem jsou průmyslové odpadní vody. Jejich složení a případný obsah síranových iontů se může u jednotlivých průmyslových provozů značně lišit [1].

Zvláštní pozornost musí být také věnována mořské vodě. Tato voda obsahuje rozpuštěné různé složky včetně síranových iontů. Celkový obsah rozpuštěných látek v mořské vodě je také výrazně vyšší, než je běžné u podzemní vody nebo u vody z řek a jezer [1].

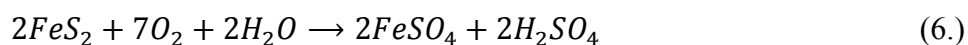
V některých geografických oblastech může také dešťová voda obsahovat zvýšené množství kyseliny sírové. Taková situace bývá obvykle v okolí elektráren a dalších průmyslových objektů, které využívají jako zdroj energie tuhá paliva. Jejich spalováním dochází k uvolňování SO_2 do ovzduší, pokud není provoz vybaven jednotkou k odsíření spalin [1].

Vody mohou kromě samotných síranů obsahovat i další složky, které mohou vést také k degradaci betonu. Škodlivý účinek síranů v kombinaci s ostatními složkami vede zpravidla ke škodlivějším účinkům na beton [1].

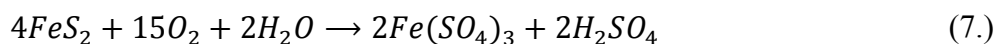
Vnější síranová koroze začíná působit nejprve na betonový povrch. Síraný působí na cementový tmel na povrchu materiálu a s pokračujícím korozním procesem postupuje směrem dovnitř materiálu. Dochází k migraci korozního činidla dovnitř materiálu. Rychlost postupu korozního činidla dovnitř materiálu závisí na jeho pórovitosti a jeho propustnosti pro kapaliny. V některých případech také může dojít k ovlivnění této rychlosti vyplněním stávajících pórů reakčními produkty. Při nedostatečném zhutnění betonu může docházet k průniku korozního činidla hlouběji do materiálu a může docházet k rozsáhlejšímu poškození betonu [1].

2.3 Vnější síranová koroze působením kyseliny sírové

Existuje několik zdrojů kyseliny sírové, které se mohou dostat do kontaktu s betonovými konstrukcemi. Kyselina sírová může být obsažena v podzemní vodě. K jejímu vytvoření dochází oxidací sulfidů obsažených v půdě, zejména pyritu, který je v některých půdách přítomný. Oxidace probíhá během zvětrávání za přítomnosti kyslíku ze vzduchu:

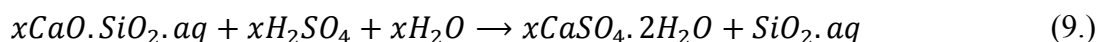
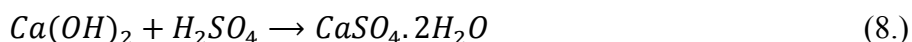


nebo



Kyselina sírová může být obsažena také v průmyslových odpadních vodách. Kyselina sírová může být vytvořena také v kanalizaci. Kyselina začne vznikat působením sírano – redukují bakterie (např. *Desulfovibrio*). Jejím působením jsou sírné sloučeniny přítomné v odpadní vodě redukovány na H_2S , který uniká do atmosféry v kanalizaci. Zde může H_2S reagovat s kyslíkem na elementární síru, která se ukládá na kanalizační zdi. Síra se stává substrátem pro oxidující bakterie, které ji dokážou převést na kyselinu sírovou. Kyselina sírová může být také přítomná v dešťové vodě, kde vzniká oxidací SO_2 , vznikajícímu spalováním fosilních paliv. Dochází ke snižování pH dešťové vody, kdy v extrémních případech se může pH pohybovat v okolí $pH = 4$ [1].

Při síranové korozi způsobené kyselinou sírovou vzniká jako první krok dihydrát síranu vápenatého reakcí kyseliny sírové s hydroxidem vápenatým. Dále reaguje C-S-H gel s kyselinou sírovou za vzniku amorfního hydratovaného oxidu křemičitého:



Působením kyseliny sírové dochází ke snižování pH. Vápeno-síranaluminátová hydratovaná fáze, obsažená v hydratovaném cementovém tmelu, ztrácí svou stabilitu a dochází k rozkladu na sádrovec a síran hlinitý. Zároveň se ale může uskutečnit omezená tvorba ettringitu v hlubších částech betonového tělesa, ve které je ještě udržována dostatečně vysoká hodnota pH [1].

Chemické reakce, které probíhají působením kyseliny sírové na beton, vedou k hluboké degradaci cementové pasty. Tyto reakce jsou také spojeny se ztrátou pevnosti. V případě, že betonový povrch, na který působí síranová koroze, je vystaven tekoucí vodě, jsou výsledné produkty degradace, zejména alkalické sírany, síran hlinitý a v menší míře také síran vápenatý, unášeny ve značné míře vodou z degradovaného povrchu [1].

Betony, ve kterých bylo použito kamenivo nebo příměsi na bázi uhličitánů, jako například vápenec ($CaCO_3$), dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) nebo magnezit ($MgCO_3$), bývají citlivější k síranové korozi. Tyto agregáty jsou rozpustné v kyselině a dochází k jejich rozkladu společně s cementovým tmelem [1].

Obecně platí, že síranová koroze vyvolaná působením volné kyseliny sírové bývá závažnější, než koroze způsobená sírany s neutrálním pH [1].

2.4 Předcházení síranové korozi betonu

Ke zlepšení odolnosti betonu vůči síranové korozi je vhodné vytvořit kvalitní beton s malou propustností, který neumožní pronikání agresivních látek do své struktury. Další možností je návrh betonu se síranovzdorným pojivem (cementem). Také je důležité správné ukládání na staveništi, dostatečné zhutnění čerstvého betonu a správné ošetřování betonu po betonáži [1].

3 Teoretická část

Pro potřeby této práce bylo navrženo pět různých receptur betonu, které odpovídaly požadavkům na beton dle normy ČSN EN 206 [3]. Z jednotlivých záměsí byla připravena zkušební tělesa o rozměrech 100x100 mm. Část těles byla ponechána jako referenční a zbytek zkušebních těles byl uložen do agresivního prostředí bohatého na sírany.

Agresivní prostředí bylo vytvořeno dle požadavků normy ČSN EN 206. V této normě je uvedeno množství SO_4^{2-} pro prostředí třídy XA1, XA2 a XA3. Toto množství je uvedeno v koncentracích síranů pro každé z prostředí. Jednotlivé koncentrace jsou uvedeny v (tab. 1). Norma však již neuvádí původ síranů. Agresivní prostředí bylo připraveno naředěním kyseliny sírové a to tak, aby bylo dosaženo požadovaných koncentrací síranových iontů.

Tab. 1: Množství SO_4^{2-} pro jednotlivé třídy agresivního prostředí dle normy ČSN EN 206

Chemická charakteristika	prostředí		
	XA1	XA2	XA3
SO_4^{2-} [mg.l ⁻¹]	200 - 600	600 - 3000	3000 - 6000

Byly připraveny 3 roztoky o koncentracích 600 mg.l⁻¹ pro prostředí XA1, 3000 mg.l⁻¹ pro prostředí XA2 a 6000 mg.l⁻¹ pro prostředí XA3. Do těchto roztoků byly uloženy zkušební tělesa. U roztoků bylo změřeno jejich pH a toto pH bylo udržováno po celou dobu naložení

zkušebních těles v roztocích kyseliny sírové. Tím bylo dosaženo udržování požadované koncentrace síranových iontů po celou dobu.

Na referenčních vzorcích, které nebyly vystaveny agresivnímu prostředí, bylo provedeno zjištění mechanických a fyzikálních vlastností připravených betonů. Byla zjištěna jejich objemová hmotnost, zdánlivá pórovitost, skutečná pórovitost, zdánlivá hustota, měrná hmotnost, dynamický modul pružnosti a pevnost v tlaku.

Byly také připraveny cementové pasty se stejným poměrem množství cementu, vody a příměsí, jako u navržených betonů. Tyto vzorky byly po rozemletí vystaveny stejnému agresivnímu prostředí jako zkušební tělesa. Na vzorcích byla poté provedena termální analýza a spektrometrie ke zjištění změn, které proběhly v jejich složení.

3.1 Návrh složení betonu

Návrh složení betonových záměsí závisí především na požadované výsledné pevnosti betonu v tlaku. Pro správný návrh složení betonu je nutné znát objemové hmotnosti použitého kameniva, cementu a dalších případně použitých příměsí a přísad. Dále je potřeba zjistit granulometrické složení kameniva a jeho vlhkost, která také ovlivňuje potřebné množství vody.

První receptura byla navržena pro beton třídy C80/95. Další receptury byly navrženy pro beton třídy C30/37. Jedna receptura neobsahuje další příměsí, do ostatních záměsí byly přidány příměsí mletého vápence, popílku a mleté vysokopecní granulované strusky. Navržené složení jednotlivých receptur betonu je uvedeno v (tab. 2)

Tab. 2: Navržené složení betonových záměsí

Označení:	Složky:		Druh	Množství na 20 l [kg]	Množství na 1 m ³ [kg]	Třída betonu
I	Cement		Cem I 42,5 R HRANICE	9,1	455	C80/95
	Kamenivo	0/4	Těžené, Tovačov	13,74	687	
		4/8	Drcené - čedič	2,76	138	
		8/16	Drcené - čedič	21,14	1057	
	Voda			2,8	140	
	Příměs	Metakaolin		0,64	32	
	Přísada	Plastifikátor		0,126	6,3	
II	Cement		Cem I 42,5 R HRANICE	6,8	340	C30/37
	Kamenivo	0/4	Těžené, Tovačov	17,96	898	
		4/8	Těžené, Tovačov	7,44	372	
		8/16	Drcené, Bohučovice	10,52	526	
	Voda			3,7	185	
	Příměs	---		---	---	
	Přísada	---		---	---	
III	Cement		Cem I 42,5 R HRANICE	8	400	C30/37 + vápenec
	Kamenivo	0/4	Těžené, Tovačov	12	600	
		4/8	Těžené, Tovačov	3	150	
		8/16	Drcené, Bohučovice	15	750	
	Voda			3,8	190	
	Příměs	Vápenec		4	200	
	Přísada	Plastifikátor		0,06	3	
IV	Cement		Cem I 42,5 R HRANICE	8	400	C30/37 + popílek
	Kamenivo	0/4	Těžené, Tovačov	12	600	
		4/8	Těžené, Tovačov	3	150	
		8/16	Drcené, Bohučovice	15	750	
	Voda			4,8	240	
	Příměs	Popílek		4	200	
	Přísada	Plastifikátor		0,1	5	
V	Cement		Cem I 42,5 R HRANICE	8	400	C30/37 + struska
	Kamenivo	0/4	Těžené, Tovačov	12	600	
		4/8	Těžené, Tovačov	3	150	
		8/16	Drcené, Bohučovice	15	750	
	Voda			3,5	175	
	Příměs	Struska		4	200	
	Přísada	Plastifikátor		0,03	1,5	

3.2 Kamenivo

Kamenivo tvoří nosnou kostru betonu. Proto je důležitý poměr mezi navrženými frakcemi kameniva. Navržené kamenivo by mělo mít co nejmenší mezerovitost. Proto je pro návrh receptur betonu používáno různých frakcí kameniva tak, aby bylo dosaženo co nejnižší mezerovitosti. Nejdůležitější pro návrh složení betonu je znát křivky zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva, ze kterých bude beton připraven.

K přípravě záměsí betonu bylo použito kamenivo frakce 0/4 těžené Tovačov, frakce 4/8 taktéž těžené Tovačov a frakce 8/16 drcené Bohučovice. Pouze pro beton třídy C80/95 bylo použito kamenivo frakce 4/8 a 8/16 drcené.

Veškeré kamenivo použité pro přípravu betonu dle ČSN EN 206 [3] musí být deklarováno podle ČSN EN 12 620 [4]. Tato norma však pouze stanovuje deklarované úrovně určité vlastnosti, nikoli jejich požadovanou minimální nebo maximální hodnotu [5].

3.3 Zdánlivá pórovitost

Zdánlivá pórovitost vyjadřuje poměr objemu otevřených pórů k celkovému objemu tělesa včetně všech pórů [6]. Za otevřené póry se považují všechny póry, které jsou tvořeny pevnou látkou a do kterých z vnějšího prostředí může proniknout kapalina. Pro potřeby této diplomové práce byla zdánlivá pórovitost stanovena pomocí vody za normálního atmosférického tlaku. Voda za normálního atmosférického tlaku ovšem nemůže proniknout do pórů s menší velikostí (mikropóry). Tímto způsobem je tedy možné pouze změřit póry s velikostí, do kterých za normálního atmosférického tlaku může proniknout voda. K určení celkové pórovitosti včetně všech mikropórů by musela být provedena jiná zkouška, například rtuťová porozimetrie [7].

3.4 Zdánlivá hustota

Zdánlivá hustota (ZH) udává hmotnost jednotkového objemu vysušeného vzorku bez otevřených pórů, pouze včetně všech uzavřených pórů. Pokud by vzorek neobsahoval žádné uzavřené póry, potom by se zdánlivá hustota rovnala skutečné hustotě (měrné hmotnosti) [6].

3.5 Pevnost v tlaku

Protože je beton převážně používán jako konstrukční materiál, je jeho pevnost považována za hlavní kritérium k jeho posuzování. Pevností betonu se rozumí mezní napětí, které může v betonu vzniknout a při kterém dojde ke globálnímu porušení jeho soudržnosti. Pevnost betonu je tedy schopnost vzdorovat vznikajícím napětím. Všechna zatížení, která na konstrukci působí, vyvolávají namáhání konstrukcí kombinací tlakových, tahových a smykových napětí. Jestliže některé napětí překročí mez pevnosti, dojde k porušení soudržnosti v konstrukci. Pokud je toto porušení lokální, nedojde k zasažení celého průřezu a vznikne pouze trhлина. Pokud ale dojde k porušení globální soudržnosti, to znamená v celém průřezu, dochází k destrukci celé konstrukce [8].

Beton je kompozitní látka a její vlastnosti jsou určeny vlastnostmi složek, ze kterých je složen. Vlastnosti betonu závisí zejména na vlastnostech použitého kameniva a cementového tmele a jejich poměrnému zastoupení v betonu. Běžně používané kamenivo dosahuje vyšší pevnosti než většina běžně vyráběných betonů. Pevnost kameniva se pohybuje v rozmezí od 60 do 300 MPa. Kamenivo ovlivňuje vlastnosti betonu především svým tvarem a granulometrickým složením. Žádoucí je navrhnout podíl kameniva, aby jeho granulometrie vykazovala co nejnižší mezerovitost. Kvalitu cementového tmele charakterizuje především jeho pórovitost a vodní součinitel. Se zvyšujícím se vodním součinitelem dochází ke snižování pevnosti betonu. Množství cementového tmelu musí být navrženo tak, aby došlo k obalení povrchu všech zrn kameniva a zároveň došlo k vyplnění všech pórů [8].

Pevnost betonu je dále ovlivněna vnějšími podmínkami, při kterých dochází k tvrdnutí betonu. Důležitou roli přitom hraje vlhkost a teplota prostředí. Při uložení betonu ve vlhkém prostředí může beton trvale hydratovat. Za nejlepší je považováno uložení betonu ve vodě, protože dochází k úplnější hydrataci, což zapříčiňuje zmenšení velikosti kapilárních pórů. Při hydrataci betonu za nízké teploty dochází ke snížení rychlosti procesu hydratace. Pokud teplota klesne pod +5 °C, hydratace portlandského cementu se téměř zastavuje. Při teplotách pod bodem mrazu se hydratace zastavuje úplně. Dochází k tvorbě ledu ve struktuře betonu, což může vést i k jeho destrukci. Za optimální teplotu pro zrání betonu se udává teplota mezi +10 až +30 °C [8].



Obr. 1: Zkušební lis používaný k určení pevnosti v tlaku

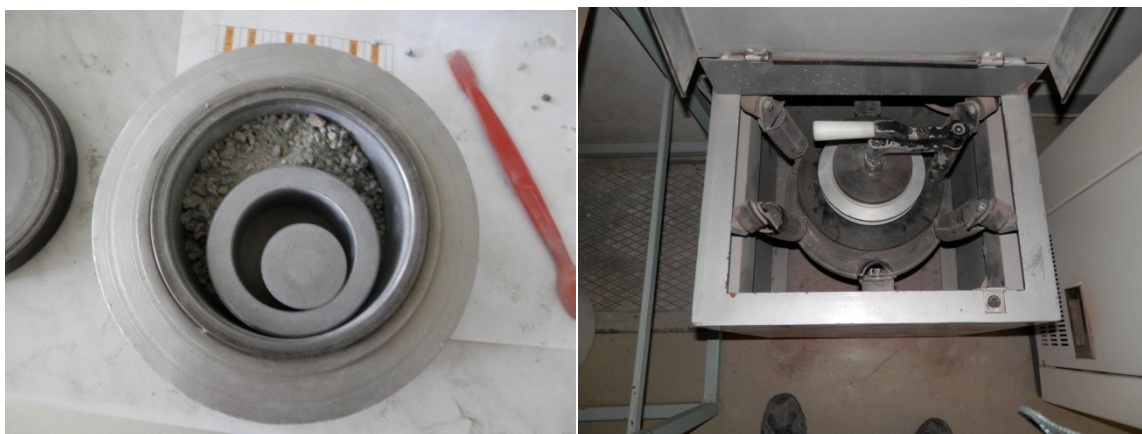
3.6 Modul pružnosti

Modul pružnosti E se definuje jako poměr mezi napětím a jím vyvolaným poměrným přetvořením. Závislost napětí na přetvoření je v počátku zatěžování lineární. Při vyšším zatížení dochází k poklesu modulu pružnosti. Rozlišujeme statický a dynamický modul pružnosti. Dynamický modul pružnosti se stanovuje nedestruktivně pomocí přístroje, který do tělesa přenáší ultrazvukové vlnění. Beton není vystaven žádnému reálnému zatížení, tím pádem se ve vzorku nevyskytují žádná napětí, čímž nedochází ke vzniku mikrotrhlin. Proto vycházejí hodnoty dynamického modulu pružnosti vyšší než hodnoty statického modulu pružnosti. Protože principy stanovení těchto dvou modulů pružnosti jsou odlišné a beton je také značně heterogenní materiál, není možné určit přesný vztah k přepočtu dynamického modulu pružnosti na statický. Navzdory tomu je v literatuře možné objevit určité empirické vztahy mezi těmito moduly pružnosti [9].

3.7 Stanovení měrné hmotnosti

Měrná hmotnost (ρ) nebo také skutečná hustota vzorků vyjadřuje hmotnost jednotkového objemu vzorku bez dutin a pórů. Měrná hmotnost byla stanovena pyknometrickou metodou. Vzorky ke zjištění měrné hmotnosti pyknometrickou metodou byly odebrány z porušených referenčních zkušebních těles po stanovení jejich pevnosti v tlaku. Odebrané vzorky se nejprve nadrtili na čelistovém drtiči a následně se pomlely v mlýnu (obr. 2). Zkouška se provádí pomocí pyknometru (obr. 3). Nejprve se určí hmotnost prázdného vysušeného pyknometru včetně zátky – hmotnost m_1 . Pomleté vzorky se vloží do pyknometru a určí se hmotnost pyknometru se zátkou naplněného vzorkem – hmotnost m_2 . Poté se do pyknometru doplní demineralizovaná voda tak, aby v pyknometru nezůstal žádný vzduch a pyknometr se uzavře zátkou. Pyknometr se opět zváží – hmotnost m_3 . Předpokladem je, že hydratovaný cement po 28 dnech již pouze minimálně reaguje s vodou, a výsledky tak nejsou hydratací výrazněji zkresleny. Pyknometr se vypláchne a zbaví se zbytků vzorku. Pyknometr se naplní po okraj demineralizovanou vodou, opět se určí jeho hmotnost m_4 . Z takto naměřených hmotností se vypočte měrná hmotnost vzorku dle vztahu [10]:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3 - m_1 + m_2} \cdot \rho_w \quad (10.)$$



Obr. 2: Otevřený mlýn naplněný nadrceným kamenivem a uzavřený mlýn připravený k mletí



Obr. 3: Pycnometr se zátkou

3.8 Stanovení skutečné pórovitosti

Skutečná pórovitost udává poměr objemu všech pórů, jak otevřených tak uzavřených, k celkovému objemu tělesa. Skutečná pórovitost (PS) se stanoví výpočtem z již zjištěných hodnot objemové (OH) a měrné hmotnosti (ρ). Výpočet se provede pomocí vzorce [10]:

$$PS = \frac{\rho - OH}{\rho} \cdot 100 \quad (11.)$$

Takto vypočtená skutečná pórovitost se udává v procentech.

4 Experimentální část

4.1 Zkoušky provedené na referenčních vzorcích

Na referenčních vzorcích, které nebyly vystaveny agresivnímu prostředí, byly provedeny zkoušky stanovení objemové hmotnosti (gravimetricky a vážením na hydrostatických

vahách), stanovení zdánlivé a skutečné pórovitosti, skutečné a zdánlivé hustoty, stanovení pevnosti v tlaku a dynamického modulu pružnosti.

4.1.1 Stanovení objemové hmotnosti gravimetricky

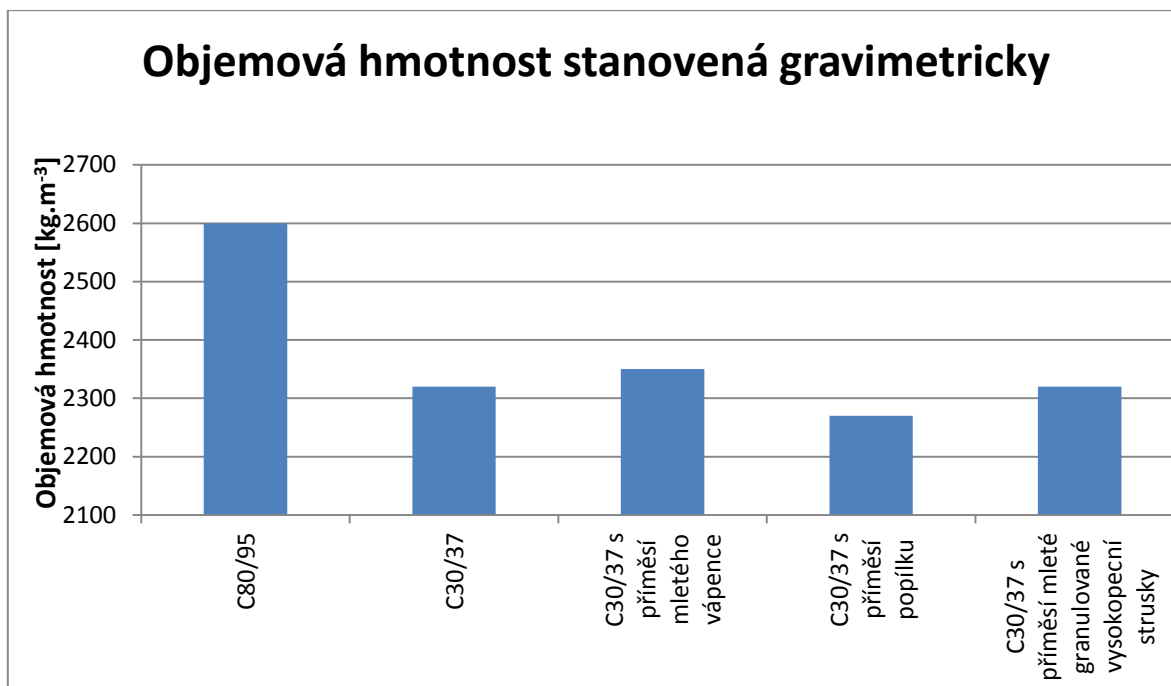
Objemová hmotnost byla gravimetricky určena na vodou nasycených zkušebních tělesech. Zkušební tělesa se zváží. Poté je nutné stanovit objem zkušebních vzorků. Objem se vypočte ze skutečně změřených rozměrů. Rozměry se změří pomocí posuvného měřítka. Objem vzorků z naměřených rozměrů se vypočte pomocí známých vztahů pro výpočet objemu těles. Objemová hmotnost se spočte užitím vzorce [11]:

$$\rho_v = \frac{m}{V} \quad (12.)$$

Objemová hmotnost stanovená gravimetricky pro jednotlivé záměsi betonu je uvedena v (tab. 3).

Tab. 3 Stanovení objemové hmotnosti gravimetricky

označení	hmotnost vzorku nasyceného vodou na vzduchu [g]	Rozměry [mm]			objemová hmotnost stanovená gravimetricky [kg.m ⁻³]	průměrná objemová hmotnost stanovená gravimetricky [kg.m ⁻³]
		a	b	c		
I-1A	2621,1	100,39	100,20	100,51	2590	2600
I-1B	2586,4	100,09	100,03	99,51	2600	
I-1C	2665,1	99,75	100,05	102,15	2610	
II-1A	2369,9	100,51	100,26	100,82	2330	2320
II-1B	2342,1	100,66	100,21	101,05	2300	
II-1C	2366,5	100,31	100,03	101,42	2330	
III-1A	2395,2	100,60	100,21	100,61	2360	2350
III-1B	2369,1	100,65	100,27	99,13	2370	
III-1C	2389,6	100,70	100,06	102,05	2320	
IV-1A	2293,2	100,36	100,10	101,12	2260	2270
IV-1B	2276,2	100,32	100,36	99,23	2280	
IV-1C	2281,4	100,77	100,04	99,47	2280	
V-1A	2374,2	100,57	100,52	101,17	2320	2320
V-1B	2374,2	100,19	100,28	101,90	2320	
V-1C	2381,0	100,98	100,21	101,00	2330	



Obr. 4: Zobrazení objemové hmotnosti jednotlivých záměsí určené gravimetricky

4.1.2 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením

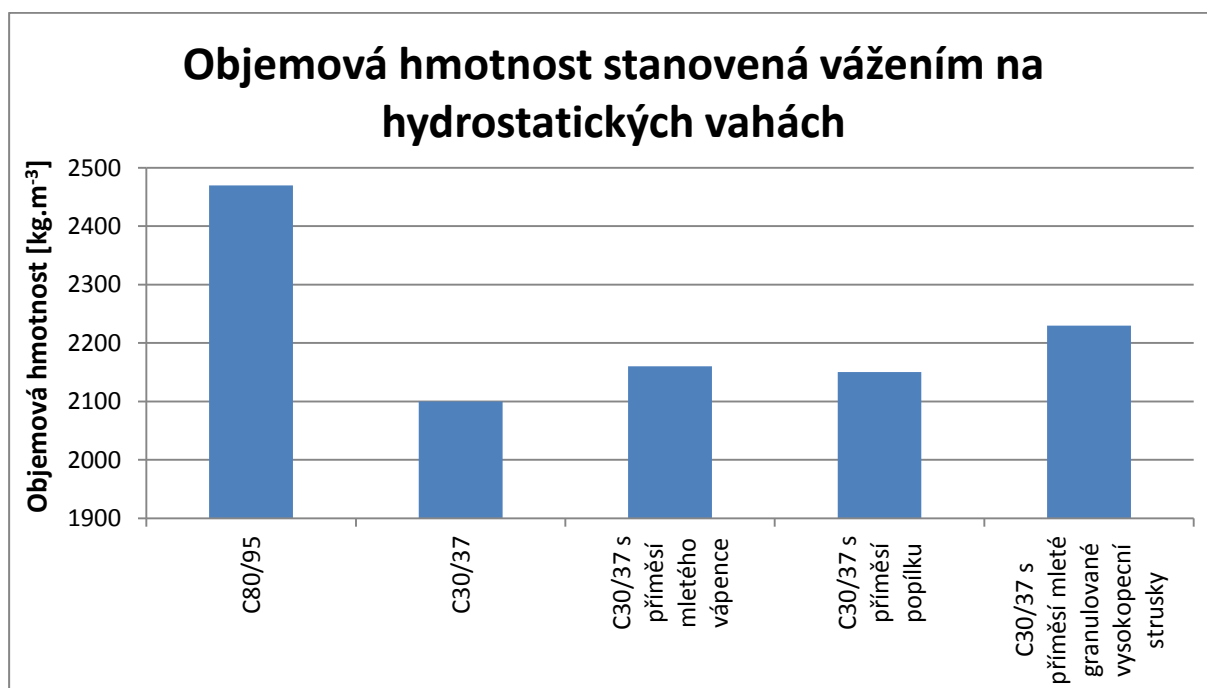
Objemová hmotnost tělesa je hmotnost jednotkového objemu vzorku včetně všech dutin a pórů, které těleso obsahuje. Zkouška se provádí podle ČSN EN 12390-7 [11]. Zkušební tělesa se nejprve zváží na vzduchu. Zjistí se hmotnost nasycených vzorků na vzduchu m_n . K určení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením je dále nutné zvážit tělesa nasycená vodou na hydrokopických vahách pod vodou. Při vážení na hydrostatických vahách se vzorek umístí na pomocnou konstrukci tak, aby byl zcela ponořen pod vodou a zároveň se nedotýkal stěn nádoby, do které byl ponořen. Odečte se hmotnost m_{nw} . Poté se tělesa nechají vysušit v sušárně do ustálené hmotnosti. Vysušené vzorky se opět zváží a zaznamená se jejich hmotnost m_s . Objemová hmotnost se vypočte pomocí vztahu [11]:

$$OH = \frac{m_s}{(m_n - m_{nw})} \cdot \rho_w \quad (13.)$$

Tato zkouška byla provedena na krychlových referenčních vzorcích o rozměrech 100 x 100 mm z každé záměsí. Naměřené hodnoty zjištěných hmotností a z nich vypočtené objemové hmotnosti jsou uvedeny v (tab. 4).

Tab. 4 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením

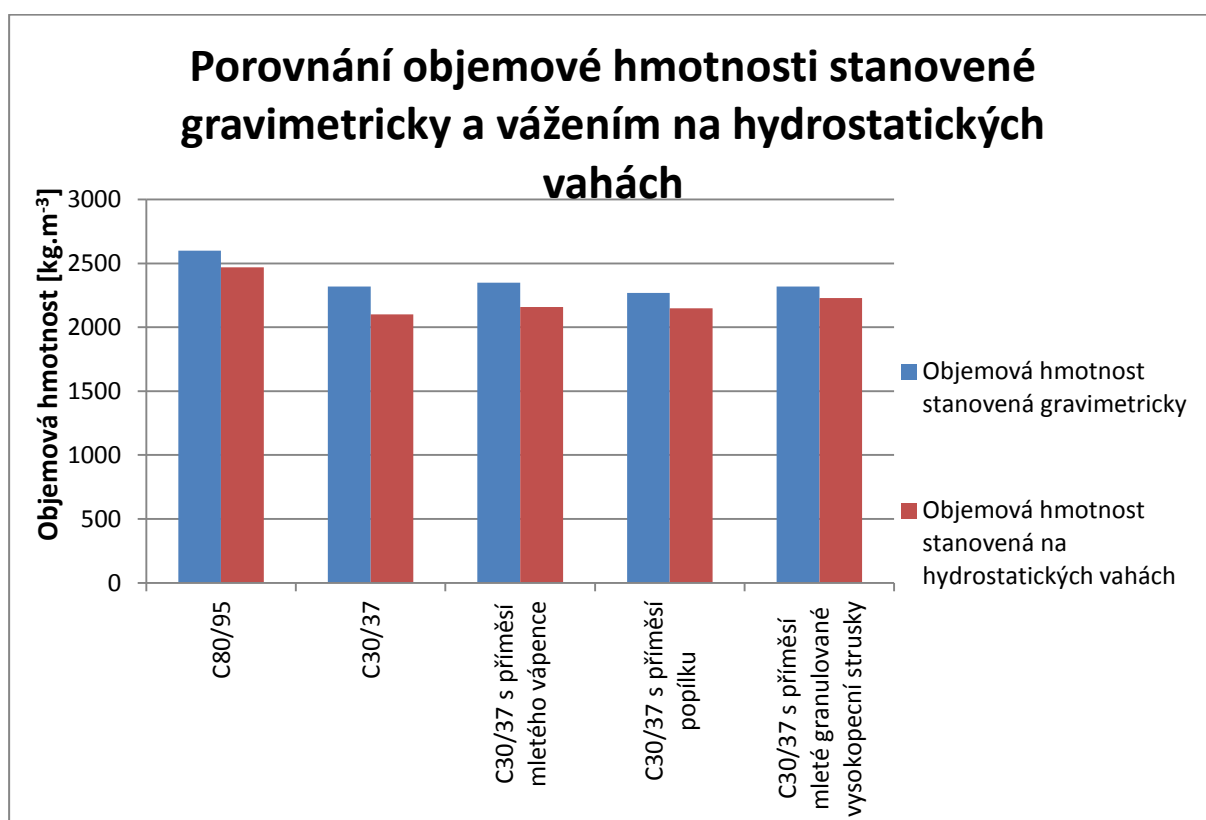
označení	m_n - hmotnost vzorku nasyceného vodou na vzduchu [g]	m_s - hmotnost vysušeného vzorku [g]	m_{nw} - hmotnost vodou nasyceného vzorku pod vodou [g]	objemová hmotnost stanovená na hydrostatických vahách [kg.m^{-3}]	průměrná objemová hmotnost stanovená na hydrostatických vahách [kg.m^{-3}]
I-1A	2621,1	2565,8	1595,4	2450	2470
I-1B	2586,4	2530,3	1597,1	2510	
I-1C	2665,1	2611,6	1615,2	2440	
II-1A	2369,9	2253,0	1329,9	2110	2100
II-1B	2342,1	2227,5	1313,2	2100	
II-1C	2366,5	2250,4	1325,9	2100	
III-1A	2395,2	2289,3	1379,8	2190	2160
III-1B	2369,1	2261,4	1350,2	2160	
III-1C	2389,6	2279,2	1353,7	2140	
IV-1A	2293,2	2191,6	1306,2	2150	2150
IV-1B	2276,2	2179,7	1319,7	2210	
IV-1C	2281,4	2182,1	1266,4	2090	
V-1A	2374,2	2260,2	1386,6	2220	2230
V-1B	2374,2	2263,5	1385,3	2220	
V-1C	2381,0	2265,1	1404,3	2250	



Obr. 5: Objemová hmotnost jednotlivých záměsů určená hydrostatickým vážením



Obr. 6: Zkušební těleso vážené pod vodou na hydrostatických vahách



Obr. 7: Srovnání objemových hmotností určených gravimetricky a vážením na hydrostatických vahách

Mezi objemovými hmotnostmi stanovenými gravimetricky a objemovými hmotnostmi stanovenými pomocí hydrostatických vah (obr. 7) lze pozorovat, že se jejich hodnoty mírně liší. Tyto rozdíly mohou být způsobeny tím, že tělesa nemají dokonale pravidelný tvar, a proto není možné přesně spočítat jejich objem z naměřených rozměrů.

4.1.3 Stanovení zdánlivé pórovitosti

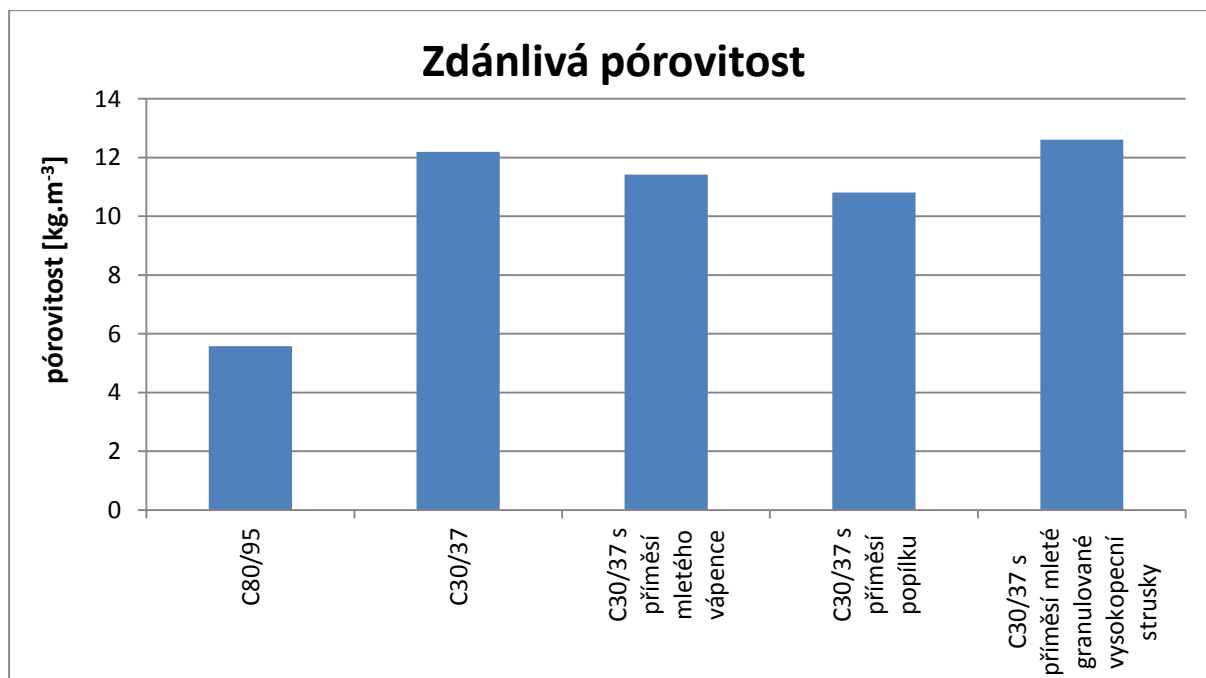
Vlastní zkouška probíhá obdobně jako stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením, proto se tyto zkoušky provádějí společně. Nejdříve je nutno vzorky nasycené vodou zvážit na hydrostatické váze ponořené do vody, tím získáme hmotnost m_{nw} , poté se zkušební tělesa povrchově otřou a zváží se na vzduchu, zaznamená se jejich hmotnost m_n . Dále se vzorky nechají vysušit v sušárně až do dosažení ustálené hmotnosti a opět se určí jejich hmotnost m_s . Zdánlivá pórovitost se poté vypočítá vztahem:

$$PZ = \frac{m_n - m_s}{(m_n - m_{nw})} \cdot 100 \quad (14.)$$

Zdánlivá pórovitost byla opět určena na vybraných zkušebních tělesech tvaru krychle o rozměrech 100 x 100 mm od každé připravené záměsi. Jednotlivé naměřené hmotnosti a vypočítaná zdánlivá pórovitost je uvedena v (tab. 5) [11].

Tab. 5: Stanovení zdánlivé pórovitosti

označení	m_n - hmotnost vzorku nasyceného vodou na vzduchu [g]	m_s - hmotnost vysušeného vzorku [g]	m_{nw} - hmotnost vodou nasyceného vzorku pod vodou [g]	zdánlivá pórovitost [%]	průměrná zdánlivá pórovitost [%]
I-1A	2621,1	2565,8	1595,4	5,58	5,58
I-1B	2586,4	2530,3	1597,1	5,89	
I-1C	2665,1	2611,6	1615,2	5,26	
II-1A	2369,9	2253,0	1329,9	12,27	12,19
II-1B	2342,1	2227,5	1313,2	12,14	
II-1C	2366,5	2250,4	1325,9	12,16	
III-1A	2395,2	2289,3	1379,8	11,27	11,42
III-1B	2369,1	2261,4	1350,2	11,44	
III-1C	2389,6	2279,2	1353,7	11,55	
IV-1A	2293,2	2191,6	1306,2	11,1	10,81
IV-1B	2276,2	2179,7	1319,7	10,84	
IV-1C	2281,4	2182,1	1266,4	10,5	
V-1A	2374,2	2260,2	1386,6	12,62	12,61
V-1B	2374,2	2263,5	1385,3	12,19	
V-1C	2381,0	2265,1	1404,3	13,01	



Obr. 8: Zdánlivá pórovitost jednotlivých záměsí

4.1.4 Stanovení zdánlivé hustoty

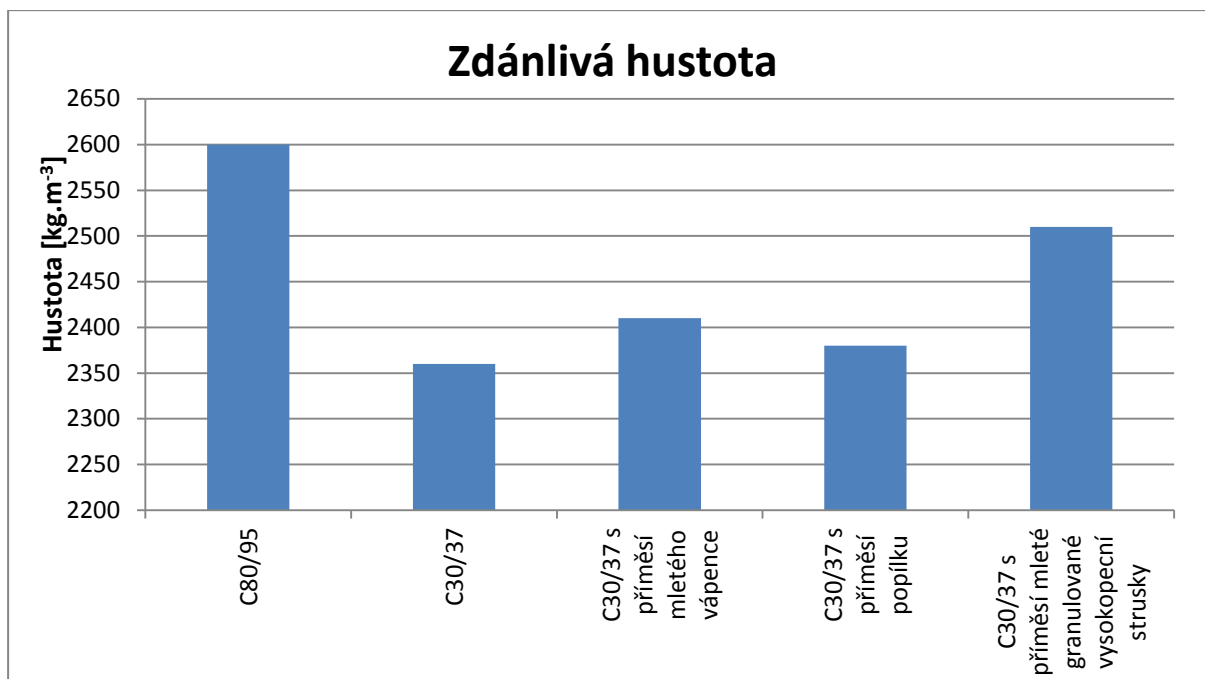
Stanovení zdánlivé hustoty se provádí společně se stanovením zdánlivé pórovitosti. Zkouška probíhá obdobně. Zkušební tělesa se zváží pod vodou na hydrostatických vahách. Poté se nechají v sušárně vysušit do ustálené hmotnosti. Liší se pouze výpočet, který se provede dle následujícího vztahu [11]:

$$ZH = \frac{m_s}{(m_s - m_{nw})} \cdot \rho_w \quad (15.)$$

Zdánlivá hustota byla určena na stejných referenčních zkušebních tělesech jako zdánlivá pórovitost. Vypočtené hodnoty zdánlivé hustoty a aritmetický průměr pro jednotlivé záměsi je uveden v (tab. 6).

Tab. 6: Stanovení zdánlivé hustoty

označení	m_s - hmotnost vysušeného vzorku [g]	m_{nw} - hmotnost vodou nasyceného vzorku pod vodou [g]	Zdánlivá hustota [kg.m ⁻³]	průměrná zdánlivá hustota [kg.m ⁻³]
I-1A	2565,8	1595,4	2590	2530
I-1B	2530,3	1597,1	2650	
I-1C	2611,6	1615,2	2570	
II-1A	2253,0	1329,9	2360	2390
II-1B	2227,5	1313,2	2360	
II-1C	2250,4	1325,9	2360	
III-1A	2289,3	1379,8	2440	2390
III-1B	2261,4	1350,2	2400	
III-1C	2279,2	1353,7	2390	
IV-1A	2191,6	1306,2	2390	2420
IV-1B	2179,7	1319,7	2450	
IV-1C	2182,1	1266,4	2310	
V-1A	2260,2	1386,6	2500	2520
V-1B	2263,5	1385,3	2490	
V-1C	2265,1	1404,3	2540	



Obr. 9: Zdánlivá hustota jednotlivých záměsů

4.1.5 Stanovení nasákavosti

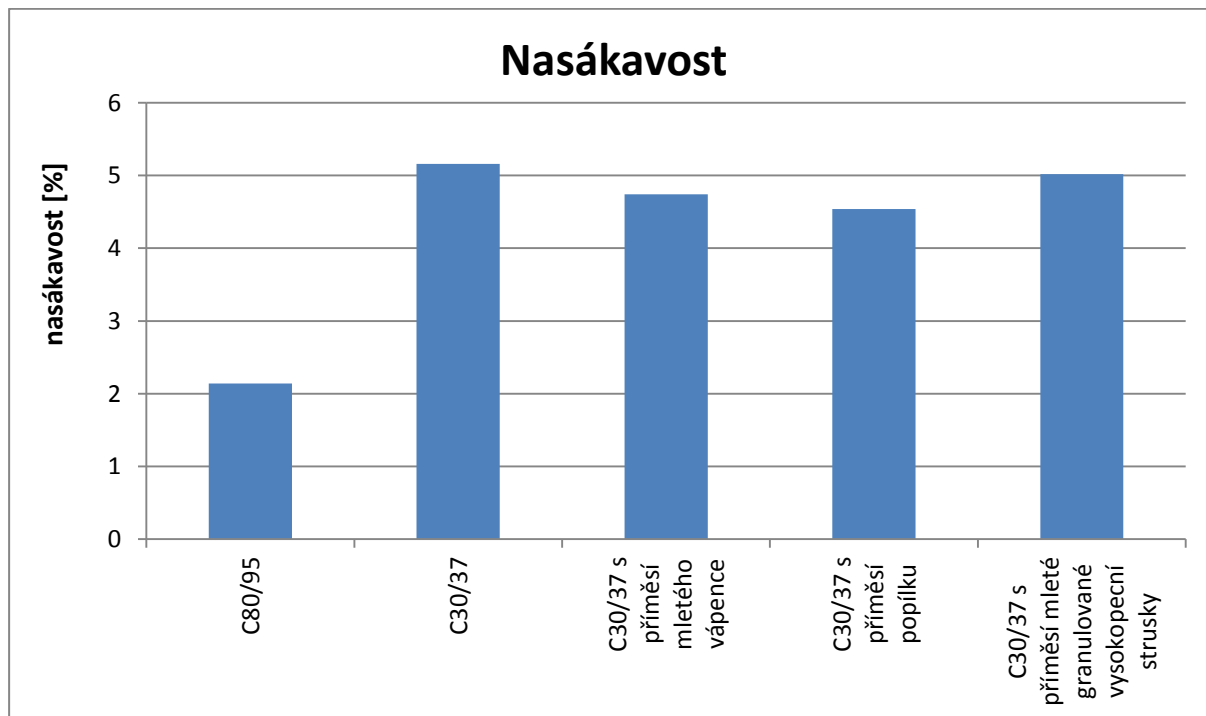
Nasákavostí se rozumí poměr hmotnosti vody, kterou je schopný zkoušený vzorek přijmout za stanovených fyzikálních podmínek, k hmotnosti vysušeného vzorku. Udává se v hmotnostních procentech [12]. Při stanovení nasákavosti (NV) se nejprve zváží vodou nasycená zkušební tělesa – hmotnost m_n . Vzorky se poté uloží do sušárny a nechají se vysušit do ustálené hmotnosti. Po vysušení se vzorky opět zváží – hmotnost m_s . Nasákavost se následně vypočte pomocí vztahu:

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (16.)$$

Nasákavost byla zjištěna na referenčních zkušebních tělesech. Její hodnoty a následně vypočtený aritmetický průměr pro každou záměs jsou uvedeny v (tab. 7).

Tab. 7: Stanovení nasákavosti vzorků

označení	m_n - hmotnost vzorku nasyceného vodou na vzduchu [g]	m_s - hmotnost vysušeného vzorku [g]	nasákavost vzorků [%]	průměrná nasákavost [%]
I-1A	2621,1	2565,8	2,16	2,14
I-1B	2586,4	2530,3	2,22	
I-1C	2665,1	2611,6	2,05	
II-1A	2369,9	2253,0	5,19	5,16
II-1B	2342,1	2227,5	5,14	
II-1C	2366,5	2250,4	5,16	
III-1A	2395,2	2289,3	4,63	4,74
III-1B	2369,1	2261,4	4,76	
III-1C	2389,6	2279,2	4,84	
IV-1A	2293,2	2191,6	4,64	4,54
IV-1B	2276,2	2179,7	4,43	
IV-1C	2281,4	2182,1	4,55	
V-1A	2374,2	2260,2	5,04	5,02
V-1B	2374,2	2263,5	4,89	
V-1C	2381,0	2265,1	5,12	



Obr. 10: Nasákavost jednotlivých záměsů

Na obrázku (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) je možné pozorovat výrazný rozdíl mezi nasákavostí záměsí betonu třídy C80/95 a betonu třídy C30/37.

4.1.6 Stanovení pevnosti v tlaku

Tlaková pevnost byla stanovena na referenčních vzorcích po 28 dnech. Zkušební vzorky jsou krychlového tvaru s rozměry 100 x 100 x 100 mm.

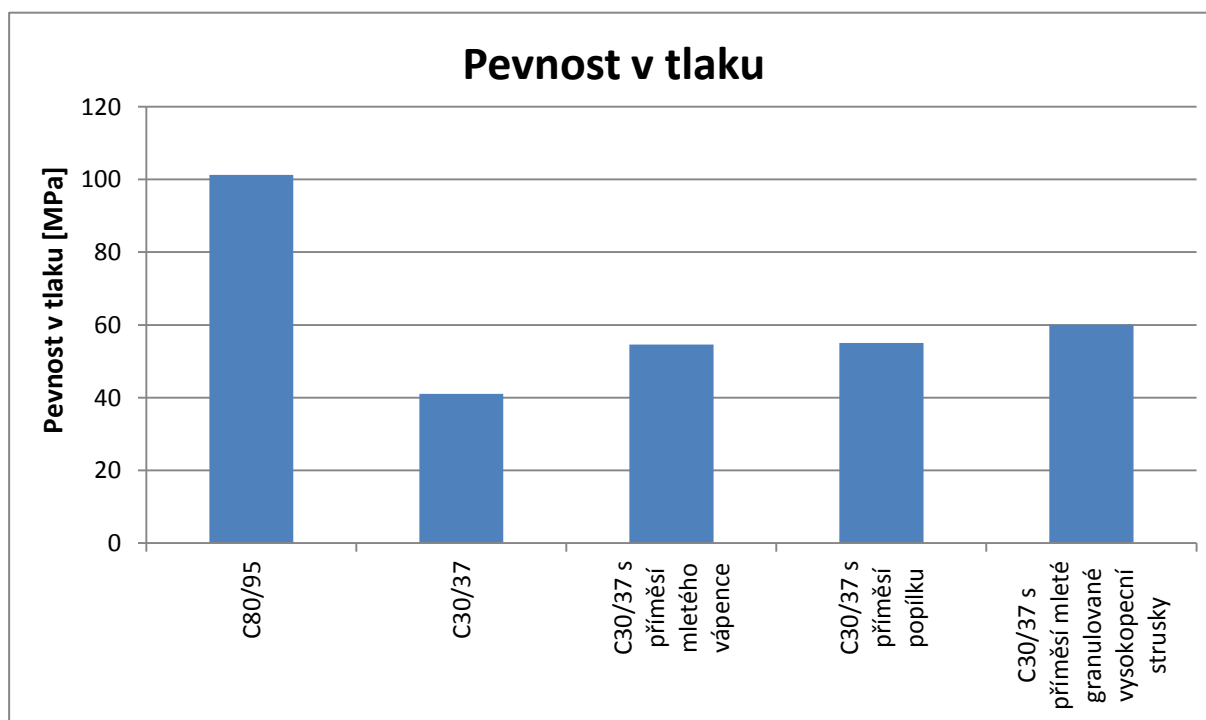
Zkouška stanovení pevnosti v tlaku probíhá na zkušebním lisu. Před vložením zkoušeného vzorku do lisu byly změřeny jeho rozměry. Poté se vzorek umístil do zkušebního zařízení tak, aby docházelo k zatěžování lisem kolmo na směr jeho plnění. Na zkušebním lisu byla nastavena vhodná rychlost zatěžování. Zatěžovací proces probíhá do doby, než dojde k porušení vzorku. Zaznamená se síla (F), při které došlo k porušení vzorku. Z naměřených hodnot zkoušených vzorků se vypočte zatěžovací plocha (A). Z těchto hodnot lze vypočíst pevnost v tlaku dle vztahu:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (17.)$$

Naměřené hodnoty rozměrů zkušebních vzorků, sil, při kterých došlo k jejich porušení, vypočtená pevnost v tlaku a průměrná pevnost v tlaku jednotlivých záměsí je uvedena v (tab. 8).

Tab. 8: Stanovení pevnosti v tlaku betonu

Označení	Rozměry [mm]			Síla při porušení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
	a	b	c			
I-1A	100,39	100,20	100,51	1044,8	103,74	101,2
I-1B	100,09	100,03	99,51	1023,5	102,82	
I-1C	99,75	100,05	102,15	992,1	97,07	
II-1A	100,51	100,26	100,82	430,3	42,57	41,1
II-1B	100,66	100,21	101,05	400,7	39,57	
II-1C	100,31	100,03	101,42	416,7	41,07	
III-1A	100,60	100,21	100,61	552,0	54,75	54,6
III-1B	100,65	100,27	99,13	534,8	53,80	
III-1C	100,70	100,06	102,05	565,2	55,35	
IV-1A	100,36	100,10	101,12	525,9	51,96	55,1
IV-1B	100,32	100,36	99,23	572,0	57,44	
IV-1C	100,77	100,04	99,47	555,1	55,78	
V-1A	100,57	100,52	101,17	622,9	61,25	60,1
V-1B	100,19	100,28	101,90	625,4	61,20	
V-1C	100,98	100,21	101,00	585,0	57,80	



Obr. 11: Srovnání pevnosti v tlaku jednotlivých záměsí

4.1.7 Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou

Přístroj k měření modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou se skládá z měřicího přístroje a dvou sond (obr. 12). Jedna sonda slouží jako budič, který vyvolává ultrazvukové vlnění a druhá sonda slouží jako snímač. Nejprve je nutno stanovit rozměry zkoušených těles. Z těchto hodnot se stanoví objemová hmotnost zkušebních těles. Na těleso se přiloží sondy, každá na opačný povrch tělesa, tak aby sondy byly naproti sobě. Měří se čas, za který ultrazvuková vlna projde skrz zkoušené těleso z budiče do snímače. Na základě tohoto změřeného času a délky zkušebního vzorku se vypočte rychlost vlnění. Dynamický modul pružnosti se vypočte pomocí vztahu [8]:

$$E_{BU} = \rho_v \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-6} \quad (18.)$$

Zkouška byla provedena na krychlových zkušebních vzorcích o rozměrech 100 x 100 x 100 mm. Naměřené hodnoty času průchodu ultrazvukových vln tělesem a následně vypočtené hodnoty modulu pružnosti byly zaznamenány do (tab. 9). Z těchto hodnot byl vypočten aritmetický průměr pro každou záměs a jejich hodnoty byly vyneseny do grafu (obr. 13).



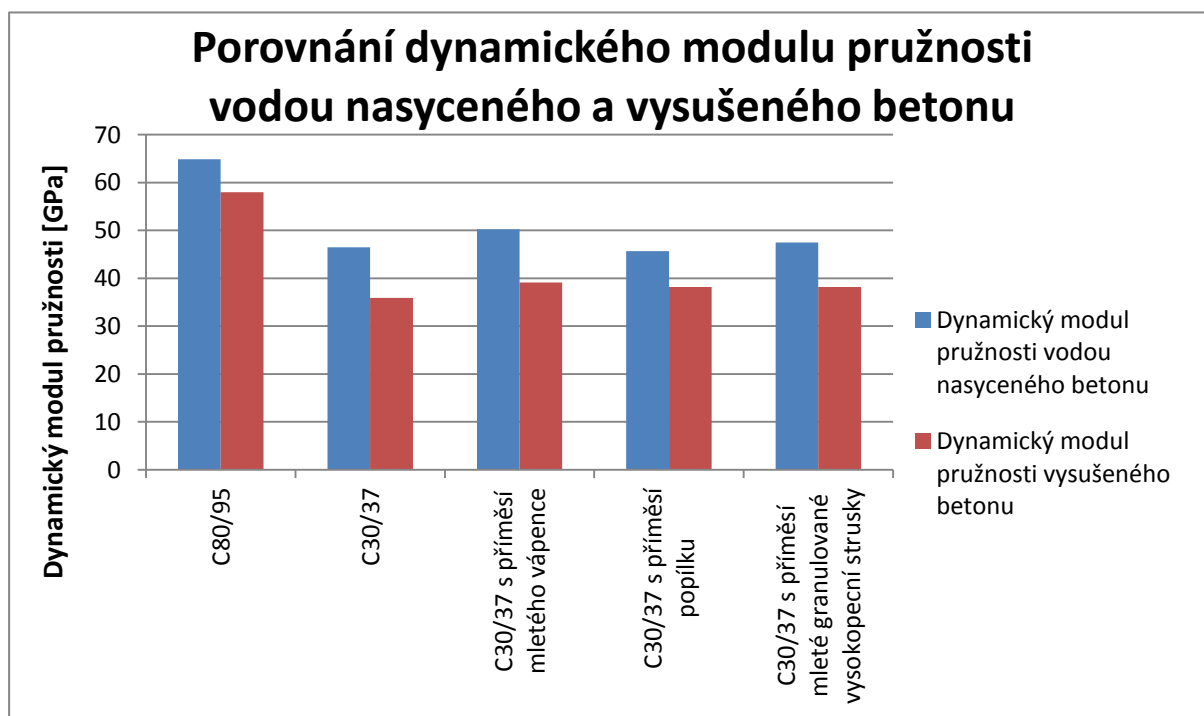
Obr. 12: Přístroj používaný ke zjištění dynamického modulu pružnosti Proceq Tico

Tab. 9: Dynamický modul pružnosti

záměs	vzorek	stav	rozměry			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	měření			E [GPa]	Prům. E [GPa]	
			a [mm]	b [mm]	c [mm]			číslo	t [μs]	v [m.s ⁻¹]			
I	1A	nasáklý vodou	100,39	100,20	100,51	2621,1	2590	1	20,4	4910	62,4	63,1	64,9
								2	20,2	4960	63,7		
								3	20,3	4940	63,2		
	1B	nasáklý vodou	100,09	100,03	99,51	2586,4	2600	1	19,8	5050	66,3	64,8	
								2	20,2	4950	63,7		
								3	20,1	4980	64,5		
	1C	nasáklý vodou	99,75	100,05	102,15	2665,1	2610	1	19,5	5130	68,7	66,7	
								2	19,8	5050	66,6		
								3	20,1	4980	64,7		
	1A	vysušený	100,39	100,20	100,51	2565,8	2540	1	21,4	4680	55,6	57,4	58,0
								2	20,9	4790	58,3		
								3	20,9	4790	58,3		
	1B	vysušený	100,09	100,03	99,51	2530,3	2540	1	20,7	4830	59,3	58,2	
								2	20,9	4790	58,3		
								3	21,1	4740	57,1		
	1C	vysušený	99,75	100,05	102,15	2611,6	2560	1	20,9	4790	58,7	58,3	
								2	21,1	4740	57,5		
								3	20,9	4790	58,7		
II	1A	nasáklý vodou	100,51	100,26	100,82	2369,9	2330	1	22,1	4540	48	47,6	46,5
								2	22,5	4460	46,3		
								3	22	4560	48,4		
	1B	nasáklý vodou	100,66	100,21	101,05	2342,1	2300	1	22,3	4490	46,4	45,6	
								2	23	4360	43,7		
								3	22,2	4510	46,8		
	1C	nasáklý vodou	100,31	100,03	101,42	2366,5	2330	1	22,1	4530	47,8	46,3	
								2	22,9	4370	44,5		
								3	22,4	4470	46,6		
	1A	vysušený	100,51	100,26	100,82	2253,0	2220	1	25	4010	35,7	35,4	35,9
								2	25,2	3980	35,2		
								3	25,1	3990	35,3		
	1B	vysušený	100,66	100,21	101,05	2227,5	2190	1	24,7	4060	36,1	35,8	
								2	25,2	3980	34,7		
								3	24,5	4090	36,6		
	1C	vysušený	100,31	100,03	101,42	2250,4	2210	1	24,7	4050	36,2	36,5	
								2	24,6	4070	36,6		
								3	24,5	4080	36,8		

záměs	vzorek	stav	rozměry			hmotnos t [g]	objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	měření			E [GPa]	Prům. E [GPa]	
			a [mm]	b [mm]	c [mm]			číslo	t [μs]	v [m.s ⁻¹]			
III	1A	nasáklý vodou	100,60	100,21	100,61	2395,2	2360	1	21,5	4660	51,2	50,9	50,2
								2	21,8	4600	49,9		
								3	21,4	4680	51,7		
	1B	nasáklý vodou	100,65	100,27	99,13	2369,1	2370	1	21,8	4600	50,1	49,7	
								2	22,2	4520	48,4		
								3	21,7	4620	50,6		
	1C	nasáklý vodou	100,70	100,06	102,05	2389,6	2320	1	21,3	4700	51,2	49,9	
								2	21,8	4590	48,9		
								3	21,6	4630	49,7		
	1A	vysušený	100,60	100,21	100,61	2289,3	2260	1	23,8	4210	40,1	40,2	39,1
								2	23,9	4190	39,7		
								3	23,6	4250	40,8		
	1B	vysušený	100,65	100,27	99,13	2261,4	2260	1	24,3	4130	38,5	38,8	
								2	24,1	4160	39,1		
								3	24,2	4140	38,7		
	1C	vysušený	100,70	100,06	102,05	2279,2	2220	1	23,9	4190	39	38,3	
								2	24	4170	38,6		
								3	24,4	4100	37,3		
IV	1A	nasáklý vodou	100,36	100,10	101,12	2293,2	2260	1	23,1	4330	42,4	43,6	45,7
								2	23,1	4330	42,4		
								3	22,2	4510	46		
	1B	nasáklý vodou	100,32	100,36	99,23	2276,2	2280	1	22,5	4460	45,4	45,5	
								2	22,5	4460	45,4		
								3	22,4	4480	45,8		
	1C	nasáklý vodou	100,77	100,04	99,47	2281,4	2280	1	22,2	4510	46,4	48,1	
								2	21,7	4610	48,5		
								3	21,5	4650	49,3		
	1A	vysušený	100,36	100,10	101,12	2191,6	2160	1	25,1	3990	34,4	34,9	34,5
								2	24,9	4020	34,9		
								3	24,7	4050	35,4		
	1B	vysušený	100,32	100,36	99,23	2179,7	2180	1	25,2	3980	34,5	34,3	
								2	25,2	3980	34,5		
								3	25,5	3940	33,8		
	1C	vysušený	100,77	100,04	99,47	2182,1	2180	1	25,5	3920	33,5	34,4	
								2	25,2	3970	34,4		
								3	24,8	4030	35,4		

záměs	vzorek	stav	rozměry			hmotnost [g]	objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	měření			E [GPa]	Prům. E [GPa]	
			a [mm]	b [mm]	c [mm]			číslo	t [μs]	v [m.s ⁻¹]			
V	1A	nasáklý vodou	100,57	100,52	101,17	2374,2	2320	1	22,7	4430	45,5	47,5	47,5
								2	22,4	4490	46,8		
								3	21,6	4650	50,2		
	1B	nasáklý vodou	100,19	100,28	101,90	2374,2	2320	1	22,6	4440	45,7	47,5	
								2	22,2	4520	47,4		
								3	21,7	4620	49,5		
	1C	nasáklý vodou	100,98	100,21	101,00	2381,0	2330	1	22,6	4430	45,7	47,6	
								2	22,1	4530	47,8		
								3	21,8	4600	49,3		
	1A	vysušený	100,57	100,52	101,17	2260,2	2210	1	24,6	4090	37	38,2	
								2	24,3	4140	37,9		
								3	23,7	4240	39,7		
	1B	vysušený	100,19	100,28	101,90	2263,5	2210	1	24,1	4160	38,2	38,8	
								2	24,1	4160	38,2		
								3	23,6	4250	39,9		
	1C	vysušený	100,98	100,21	101,00	2265,1	2220	1	24,5	4090	37,1	37,5	
								2	24,1	4160	38,4		
								3	24,5	4090	37,1		



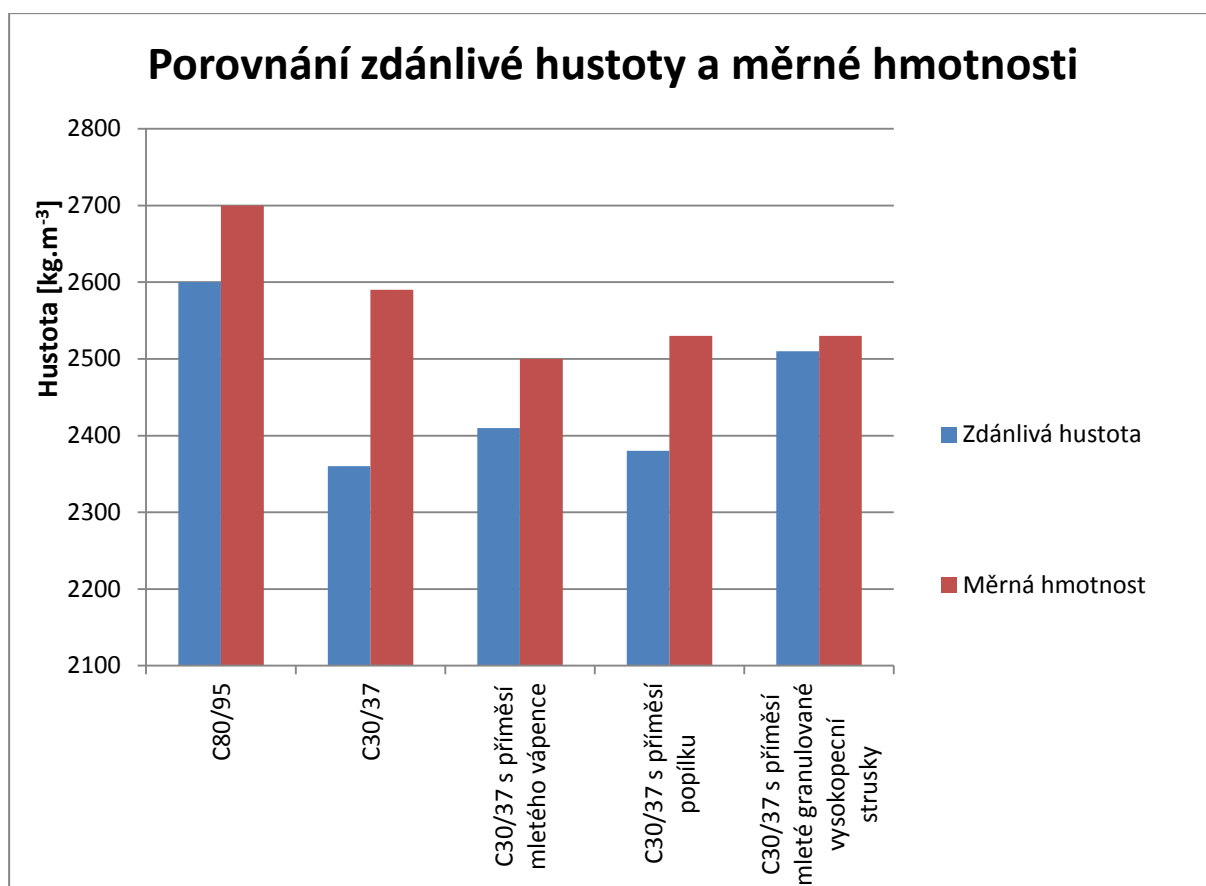
Obr. 13: Srovnání dynamického modulu pružnosti vodou nasyceného a vysušeného betonu

4.1.8 Stanovení měrné hmotnosti

Zjištěné hodnoty jsou zaznamenané do (tab. 10).

Tab. 10: Stanovení měrné hmotnosti

záměs:	číslo pyknometru:	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	m_4 [g]	hustota [kg · m ⁻³]	průměrná hustota [kg · m ⁻³]
I	78	26,7142	31,6282	78,4905	75,4011	2690	2700
	91	24,9034	29,9862	78,2076	74,9968	2710	
	92	23,4458	29,4901	78,2305	74,4177	2700	
II	1	24,8379	29,6579	77,0985	74,1363	2590	2590
	2	24,1065	30,4090	80,8286	76,9801	2560	
	3	24,7547	30,9016	79,5269	75,7152	2620	
III	96	23,7427	28,9297	77,9901	74,8789	2490	2500
	98	25,5518	31,4933	80,7340	77,1518	2510	
	99	25,4352	32,3369	79,6599	75,5263	2490	
IV	96	23,7429	30,0068	78,6919	74,8943	2530	2530
	98	25,5475	30,4785	80,1421	77,1336	2560	
	99	25,4284	31,2708	79,0506	75,5423	2500	
V	78	26,7144	32,2742	78,7507	75,3853	2530	2530
	91	24,9041	31,6855	79,1182	74,9935	2540	
	92	23,4428	30,0143	78,3783	74,4121	2510	



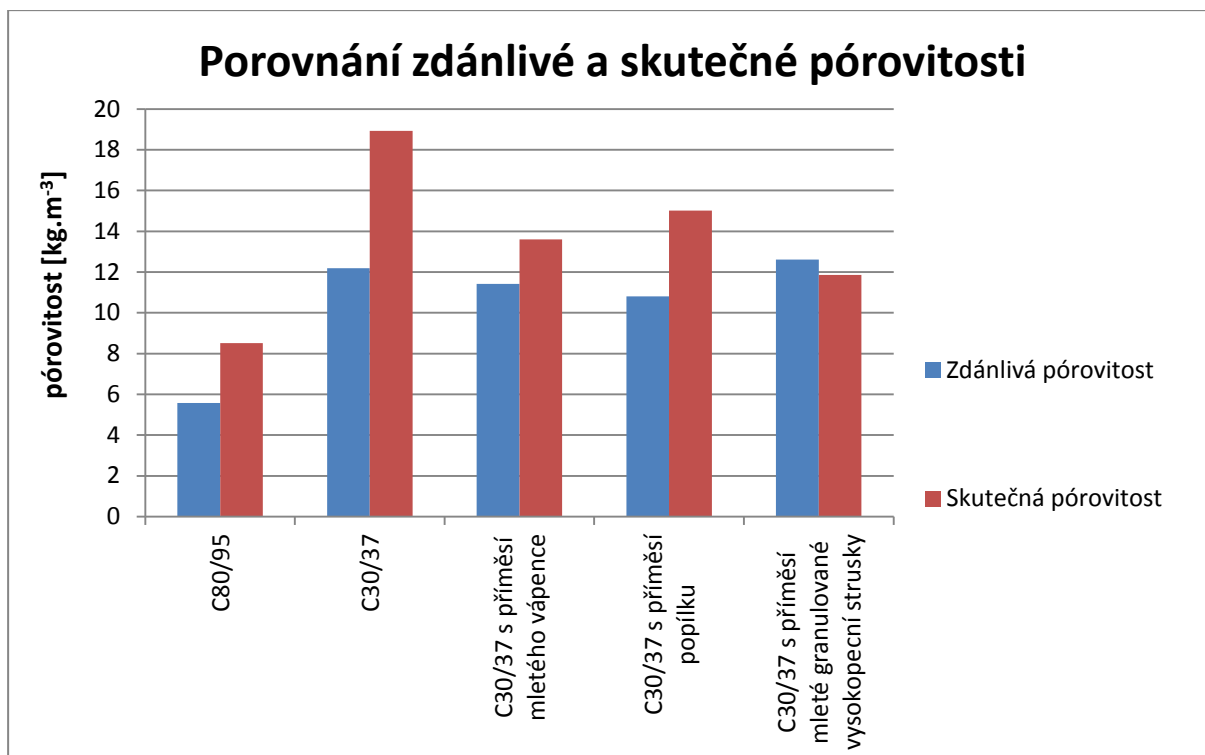
Obr. 14: Porovnání zdánlivé hustoty a měrné hmotnosti

4.1.9 Stanovení skutečné pórovitosti

Vypočtená skutečná pórovitost a naměřené hodnoty jsou zaznamenány v (tab. 11).

Tab. 11: Vypočtená skutečná pórovitost

Záměs	objemová hmotnost stanovená na hydrostatických vahách [kg.m ⁻³]	Měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	zdánlivá pórovitost [%]	skutečná pórovitost [%]
I	2470	2700	5,58	8,52
II	2100	2590	12,19	18,92
III	2160	2500	11,42	13,60
IV	2150	2530	10,81	15,02
V	2230	2530	12,61	11,86



Obr. 15: Porovnání zdánlivé a skutečné pórovitosti

4.2 Síranová koroze

Pro simulování síranové koroze byly připraveny roztoky s obsahem SO_4^{2-} iontů v koncentracích, která odpovídá požadavkům pro agresivní prostředí XA dle normy ČSN EN 206 [3]. Konkrétně pro prostředí XA1 koncentrace SO_4^{2-} odpovídala 600 mg.l^{-1} , pro prostředí XA2 3000 mg.l^{-1} a pro prostředí XA3 6000 mg.l^{-1} . Protože v této normě není uveden požadavek na původ síranů, byla jako jejich zdroj zvolena kyselina sírová, která byla naředěna tak, aby koncentrace SO_4^{2-} odpovídala požadavkům jednotlivých tříd agresivního prostředí.

Po přípravě roztoků bylo změřeno jejich pH. Toto pH bylo poté udržováno po celou dobu průběhu zkoušky na stejné úrovni. Stejného pH bylo dosahováno přidávkem kyseliny sírové do roztoku. Množství kyseliny sírové potřebné pro přípravu roztoků, které odpovídaly požadovaným množstvím síranových iontů jednotlivých tříd agresivního prostředí a přidané množství kyseliny sírové a SO_4^{2-} iontů v čase je uvedeno v (tab. 12 – 14).

Tab. 12: Změřené pH a přidané množství kyseliny sírové v čase – prostředí XA1

Měření pH prostředí XA1					
Prostředí	XA1				
Datum	pH	Přídavek H_2SO_4 [g.l ⁻¹]	Přídavek SO_4^{2-} [g.l ⁻¹]	Celkové množství přidaného SO_4^{2-} [g.l ⁻¹]	pH po úpravě
16.9.2015	---	0,63	0,60	0,60	2,20
17.9.2015	2,91	0,26	0,25	0,85	2,39
21.9.2015	11,57	0,63	0,60	1,45	2,86
22.9.2015	5,74	0,63	0,60	2,05	2,24
23.9.2015	3,46	0,61	0,59	2,64	2,34
24.9.2015	3,61	0,62	0,59	3,23	2,25
25.9.2015	2,70	0,53	0,50	3,73	2,25
29.9.2015	10,19	0,64	0,61	4,35	2,40
30.9.2015	5,77	0,63	0,60	4,95	2,40
1.10.2015	5,69	0,63	0,60	5,55	2,20
2.10.2015	4,81	0,63	0,60	6,16	2,23
5.10.2015	8,96	0,64	0,61	6,77	2,32
6.10.2015	3,13	0,50	0,48	7,25	2,28
7.10.2015	3,94	0,63	0,60	7,85	2,22
8.10.2015	3,13	0,63	0,60	8,45	2,25
12.10.2015	6,32	0,63	0,60	9,05	2,10
13.10.2015	2,78	0,45	0,43	9,48	2,20
14.10.2015	2,99	0,45	0,43	9,91	2,94
15.10.2015	2,94	0,50	0,48	10,39	2,40
20.10.2015	4,64	0,60	0,58	10,97	2,21
22.10.2015	3,28	0,60	0,58	11,55	2,30
23.10.2015	2,51	0,45	0,43	11,98	2,25
26.10.2015	3,48	0,60	0,58	12,55	2,34
27.10.2015	2,68	1,00	0,96	13,51	2,24
3.11.2015	3,94	0,63	0,60	14,12	2,25
4.11.2015	2,88	0,60	0,58	14,69	2,21
5.11.2015	2,55	0,00	0,00	14,69	2,55
9.11.2015	2,55	0,50	0,48	15,17	2,15
13.11.2015	2,18	0,00	0,00	15,17	2,18
16.11.2015	2,21	0,00	0,00	15,17	2,21
20.11.2015	2,31	0,25	0,24	15,41	2,21
23.11.2015	2,22	0,00	0,00	15,41	2,22

Tab. 13: Změřené pH a přidané množství kyseliny sírové v čase – prostředí XA2

Měření pH prostředí XA2					
Prostředí	XA2				
Datum	pH	Přídavek H_2SO_4 [g.l ⁻¹]	Přídavek SO_4^{2-} [g.l ⁻¹]	Celkové množství přidaného SO_4^{2-} [g.l ⁻¹]	pH po úpravě
16.9.2015	---	3,13	3,00	3,00	1,84
17.9.2015	2,01	0,24	0,23	3,23	1,92
21.9.2015	8,71	3,15	3,02	6,25	1,91
22.9.2015	2,47	2,98	2,85	9,10	2,00
23.9.2015	2,21	2,80	2,68	11,78	1,77
24.9.2015	1,80	0,00	0,00	11,78	1,80
25.9.2015	1,97	1,50	1,44	13,22	1,74
29.9.2015	2,18	1,25	1,20	14,42	1,89
30.9.2015	1,86	0,00	0,00	14,42	1,86
1.10.2015	2,00	0,00	0,00	14,42	2,00
2.10.2015	2,08	1,50	1,44	15,86	1,73
5.10.2015	1,98	0,00	0,00	15,86	1,98
6.10.2015	2,05	1,25	1,20	17,05	1,78
7.10.2015	1,83	0,00	0,00	17,05	1,83
8.10.2015	1,92	0,50	0,48	17,53	1,84
12.10.2015	2,03	1,25	1,20	18,73	1,75
13.10.2015	1,76	0,00	0,00	18,73	1,76
14.10.2015	1,83	0,00	0,00	18,73	1,83
15.10.2015	1,89	1,00	0,96	19,69	1,82
20.10.2015	2,02	1,25	1,20	20,89	1,77
22.10.2015	1,76	0,00	0,00	20,89	1,76
23.10.2015	1,80	0,00	0,00	20,89	1,80
26.10.2015	1,93	1,25	1,20	22,09	1,78
27.10.2015	1,78	0,00	0,00	22,09	1,78
3.11.2015	2,01	1,25	1,20	23,28	1,74
4.11.2015	1,74	0,00	0,00	23,28	1,74
5.11.2015	1,74	0,00	0,00	23,28	1,74
9.11.2015	1,75	0,00	0,00	23,28	1,75
13.11.2015	1,76	0,00	0,00	23,28	1,76
16.11.2015	1,76	0,00	0,00	23,28	1,76
20.11.2015	1,80	0,00	0,00	23,28	1,80
23.11.2015	1,81	0,00	0,00	23,28	1,81

Tab. 14: Změřené pH a přidané množství kyseliny sírové v čase – prostředí XA3

Měření pH prostředí XA3					
Prostředí	XA3				
Datum	pH	Přídavek H_2SO_4 [g.l ⁻¹]	Přídavek SO_4^{2-} [g.l ⁻¹]	Celkové množství přidaného SO_4^{2-} [g.l ⁻¹]	pH po úpravě
16.9.2015	---	6,27	6,00	6,00	1,43
17.9.2015	1,93	1,30	1,24	7,24	1,66
21.9.2015	3,76	4,06	3,88	11,12	1,77
22.9.2015	1,70	4,50	4,31	15,43	1,51
23.9.2015	1,55	3,00	2,87	18,30	1,43
24.9.2015	1,43	0,00	0,00	18,30	1,43
25.9.2015	1,43	0,00	0,00	18,30	1,43
29.9.2015	1,63	2,50	2,39	20,69	1,43
30.9.2015	1,45	0,00	0,00	20,69	1,45
1.10.2015	1,52	0,00	0,00	20,69	1,52
2.10.2015	1,58	4,35	4,16	24,85	1,34
5.10.2015	1,43	0,00	0,00	24,85	1,43
6.10.2015	1,50	1,50	1,44	26,29	1,42
7.10.2015	1,44	0,00	0,00	26,29	1,44
8.10.2015	1,54	2,00	1,91	28,20	1,44
12.10.2015	1,50	1,50	1,44	29,64	1,39
13.10.2015	1,40	0,00	0,00	29,64	1,40
14.10.2015	1,50	0,00	0,00	29,64	1,50
15.10.2015	1,51	1,00	0,96	30,59	1,43
20.10.2015	1,59	1,75	1,67	32,27	1,48
22.10.2015	1,48	0,00	0,00	32,27	1,48
23.10.2015	1,55	1,25	1,20	33,46	1,44
26.10.2015	1,57	1,75	1,67	35,14	1,43
27.10.2015	1,44	0,00	0,00	35,14	1,44
3.11.2015	1,67	2,25	2,15	37,29	1,47
4.11.2015	1,44	0,00	0,00	37,29	1,44
5.11.2015	1,44	0,00	0,00	37,29	1,44
9.11.2015	1,44	0,00	0,00	37,29	1,44
13.11.2015	1,45	0,00	0,00	37,29	1,45
16.11.2015	1,45	0,00	0,00	37,29	1,45
20.11.2015	1,53	1,25	1,20	38,49	1,43
23.11.2015	1,43	0,00	0,00	38,49	1,43

Pro potřeby práce bylo vytvořeno 5 druhů betonu dle navržených receptur. Z každého druhu betonu byly 3 zkušební vzorky uloženy do jednotlivých tříd agresivního prostředí, kde byly ponechány 30, 60 a 70 dnů. Po této době byl vždy z každé třídy agresivního prostředí vytažen jeden vzorek od každého druhu betonu. Vzorky vytažené po 30 a 60 dnech byly rozřezány. Z odřezané části byly odebrány vzorky v hloubkách 5, 10, 15 a 20 mm. Tyto vzorky byly následně pomlety v mlýně a byla na nich provedena analýza pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie. Touto metodou bylo určeno chemické složení zkoušených vzorků. Na vzorcích, které byly v agresivním prostředí uloženy 70 dnů, byla zjištěna jejich pevnost v tlaku. Na všech vzorcích vytažených z agresivního prostředí byl také stanoven jejich dynamický modul pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou.

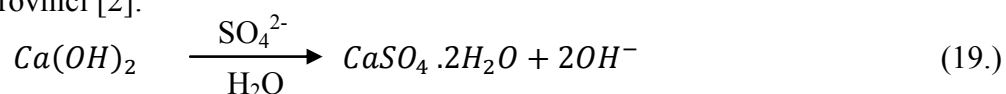
Zkušební vzorky byly agresivnímu prostředí vystaveny poměrně krátkou dobu. Vzorky byly uloženy v konstantní laboratorní teplotě. Proto se předpokládá vznik pouze sádrovce. Ke vzniku ettringitu by bylo potřeba delší vystavení betonu agresivnímu prostředí a ke vzniku thaumasitu specifické zkušební prostředí (nízká teplota).

4.2.1 Chemické složení betonu degradovaného síranovou korozí

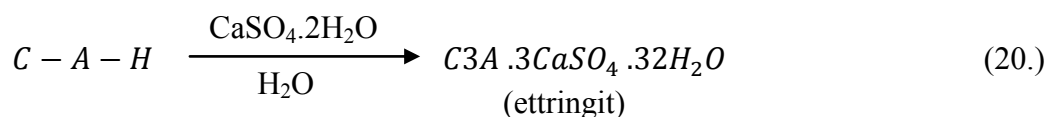
U vzorků, které byly uloženy v agresivním prostředí bohatém na sírany, byla provedena chemická analýza pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie. Tato analýza byla provedena na vzorcích, které byly odebrány z hloubky odstupňované po 5 mm. Předpokládá se, že síranová koroze působí převážně na povrchu betonu, proto byly vzorky odebírány do hloubky 20 mm.

Rentgenovou fluorescenční spektrometrií bylo zjištěno chemické složení odebraných vzorků. Chemické složení jednotlivých vzorků je uvedeno v příloze č. 1. Byl pozorován především obsah síry u jednotlivých záměsů a tříd agresivního prostředí. Taktéž byl sledován obsah síry v závislosti na hloubce odebraných vzorků.

Obsah síry byl sledován především kvůli předpokladu tvorby sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ rozkladem portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ působením síranových iontů SO_4^{2-} a vody. Tento proces lze vyjádřit rovnicí [2]:



Tím dochází ke zvýšení obsahu síry ve vzorku. Síra ve vzorku však nemusí být obsažena jen ve formě vápence, ale také ve formě ettringitu. Ten vzniká z kalcium – aluminohydrátu reakcí se sádrovcem, který vznikl pomocí výše uvedeného procesu. Rovnici reakce lze vyjádřit [2]:

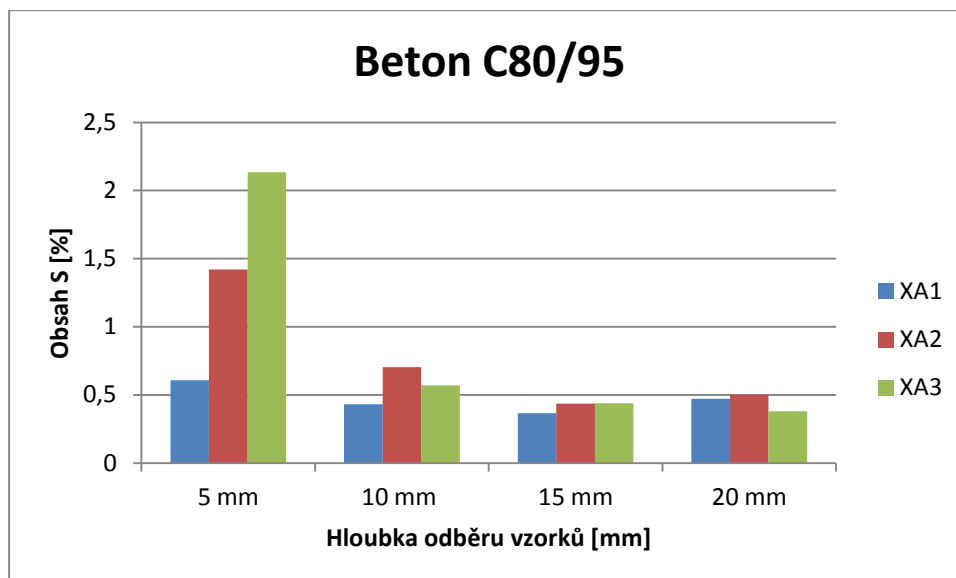


Z měření pomocí rentgenového fluorescenčního spektrometru lze pozorovat zvýšený obsah síry především na povrchu betonových zkušebních těles (do hloubky 5 mm). Větší rozdíl v obsahu síranu v hloubce do 10 mm lze pozorovat pouze u vzorků vystavených agresivnímu prostředí třídy XA3, tedy prostředí s nejvyšší koncentrací síranových iontů po delší čas (60 dnů). Vzorky vystavené tomuto agresivnímu prostředí pouze 30 dnů nevykazují v hloubce 10 mm zvýšený obsah síranů ani při vystavení agresivnímu prostředí třídy XA3. Graficky znázorněné výsledky spektrometrie jsou patrné na (obr. 16 – 31). Lze tedy předpokládat, že při delším vystavení vzorků agresivnímu prostředí by se hloubka degradace betonu zvětšovala. Taktéž je patrné, že významný vliv má koncentrace síranových iontů, které se podílí na síranové korozi betonu. Rozdíl obsahu síry v jednotlivých vzorcích po 30 a po 60 dnech je uveden v příloze č. 2. Naměřený procentní obsah síry ve vzorku je uveden v (tab. 15).

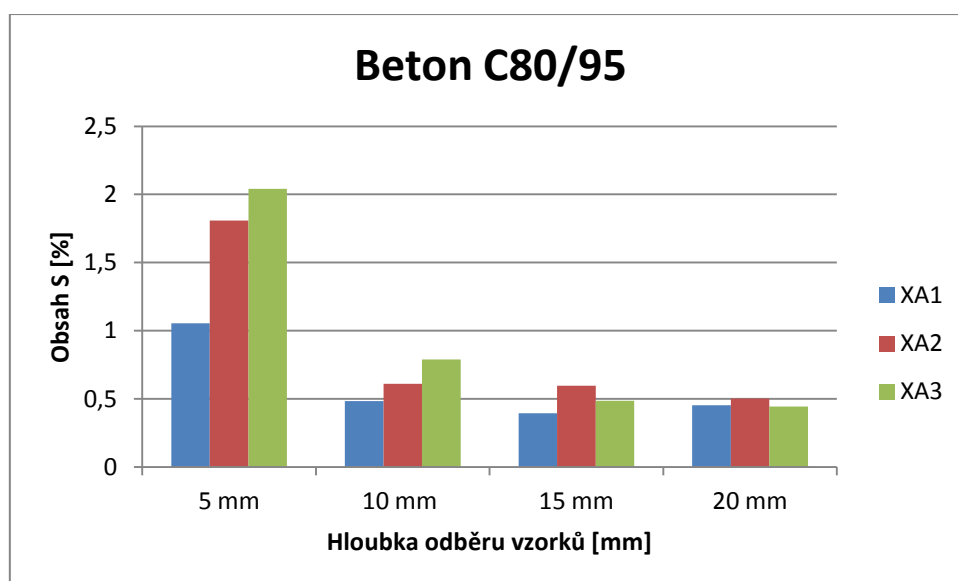
Tab. 15: Obsah síry určený ve vzorku pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie

Záměs	Prostředí uložení vzorků	Hloubka odběru vzorků	Obsah S [%] po 30 dnech	Obsah S [%] po 60 dnech
I	XA1	5 mm	0,607	1,054
		10 mm	0,431	0,484
		15 mm	0,366	0,393
		20 mm	0,471	0,452
	XA2	5 mm	1,420	1,808
		10 mm	0,704	0,611
		15 mm	0,435	0,595
		20 mm	0,502	0,501
	XA3	5 mm	2,136	2,041
		10 mm	0,569	0,789
		15 mm	0,439	0,485
		20 mm	0,380	0,444

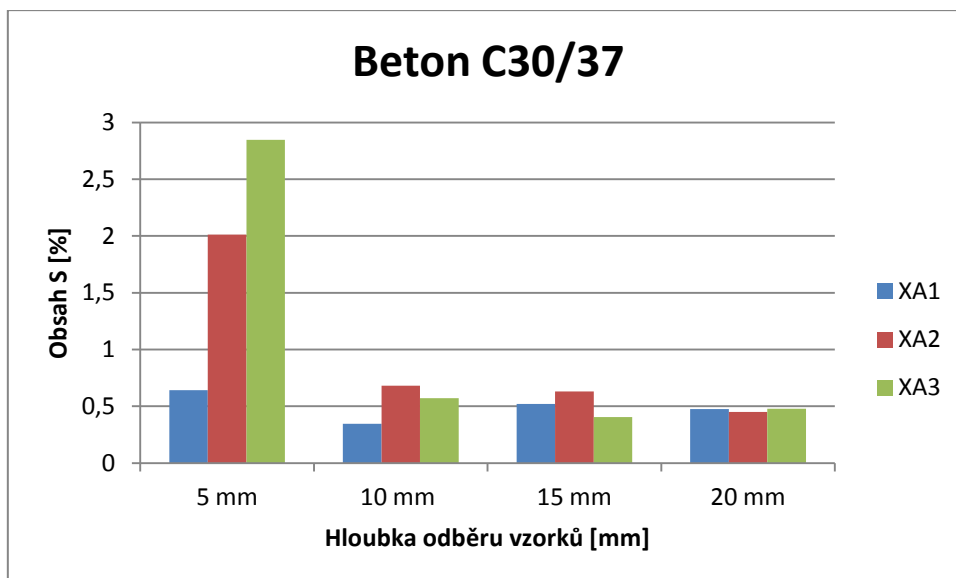
Záměs	Prostředí uložení vzorků	Hloubka odběru vzorků	Obsah S [%] po 30 dnech	Obsah S [%] po 60 dnech
II	XA1	5 mm	0,642	1,535
		10 mm	0,346	0,716
		15 mm	0,521	0,412
		20 mm	0,474	0,328
	XA2	5 mm	2,012	2,410
		10 mm	0,680	0,563
		15 mm	0,629	0,314
		20 mm	0,450	0,334
	XA3	5 mm	2,846	5,049
		10 mm	0,571	0,989
		15 mm	0,406	0,519
		20 mm	0,479	0,475
III	XA1	5 mm	0,593	0,965
		10 mm	0,377	0,369
		15 mm	0,422	0,383
		20 mm	0,510	0,431
	XA2	5 mm	1,047	1,122
		10 mm	0,466	0,407
		15 mm	0,443	0,230
		20 mm	0,506	0,406
	XA3	5 mm	1,249	1,761
		10 mm	0,536	0,577
		15 mm	0,328	0,270
		20 mm	0,232	0,354
IV	XA1	5 mm	1,031	1,932
		10 mm	0,893	0,651
		15 mm	0,619	1,013
		20 mm	0,401	0,461
	XA2	5 mm	1,599	2,720
		10 mm	0,965	1,024
		15 mm	0,855	0,837
		20 mm	0,878	0,823
	XA3	5 mm	1,855	3,948
		10 mm	0,912	1,355
		15 mm	0,671	0,833
		20 mm	0,668	0,953
V	XA1	5 mm	0,706	1,649
		10 mm	0,545	0,602
		15 mm	0,522	0,323
		20 mm	0,495	0,279
	XA2	5 mm	2,098	1,986
		10 mm	0,655	0,632
		15 mm	0,563	0,415
		20 mm	0,416	0,406
	XA3	5 mm	4,417	4,197
		10 mm	0,667	0,862
		15 mm	0,542	0,646
		20 mm	0,520	0,561



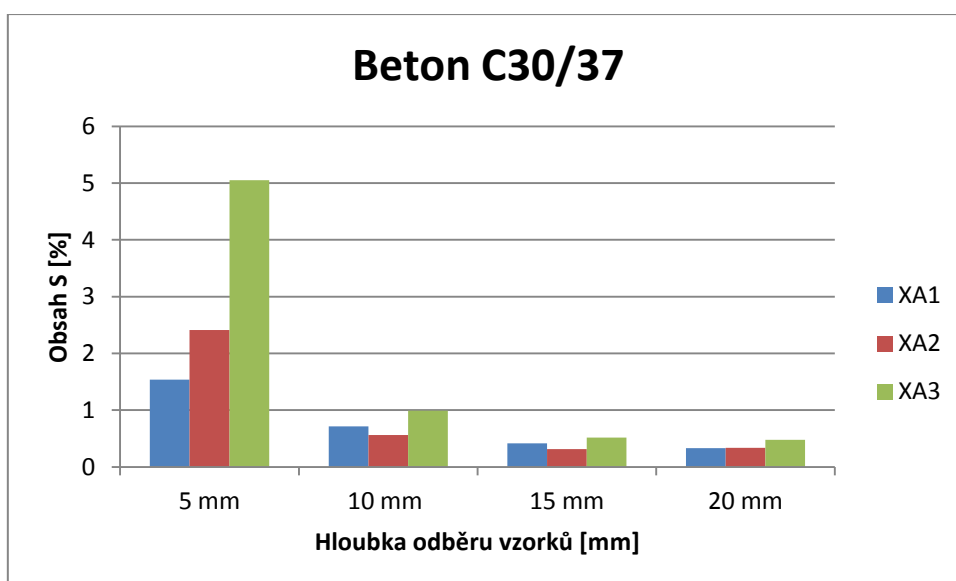
Obr. 16: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C80/95 vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 30 dnech



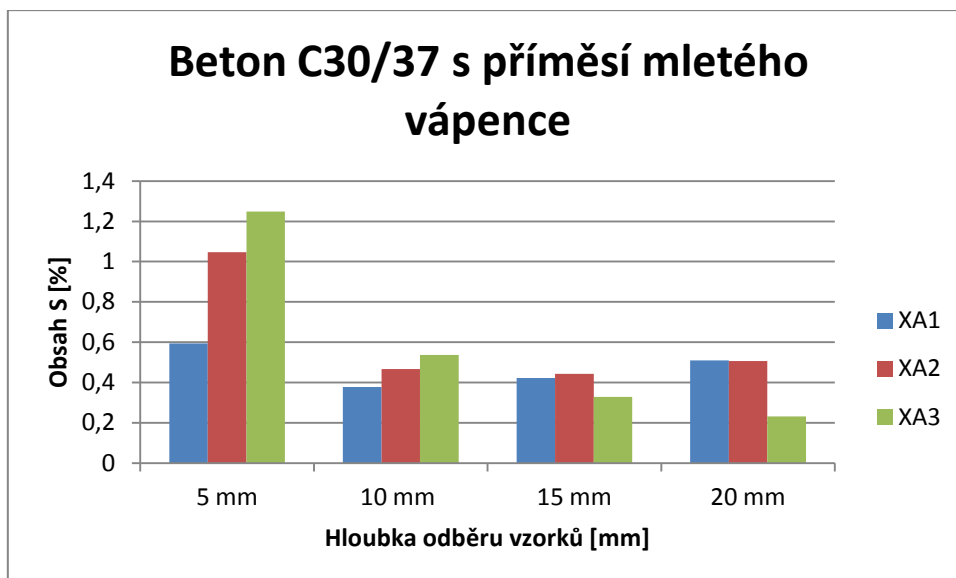
Obr. 17: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C80/95 vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 60 dnech



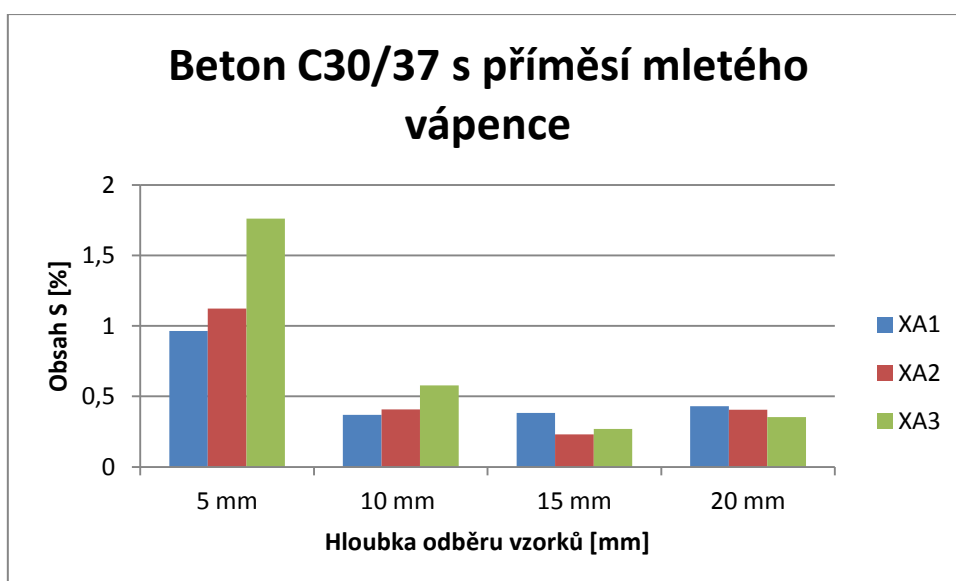
Obr. 18: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 30 dnech



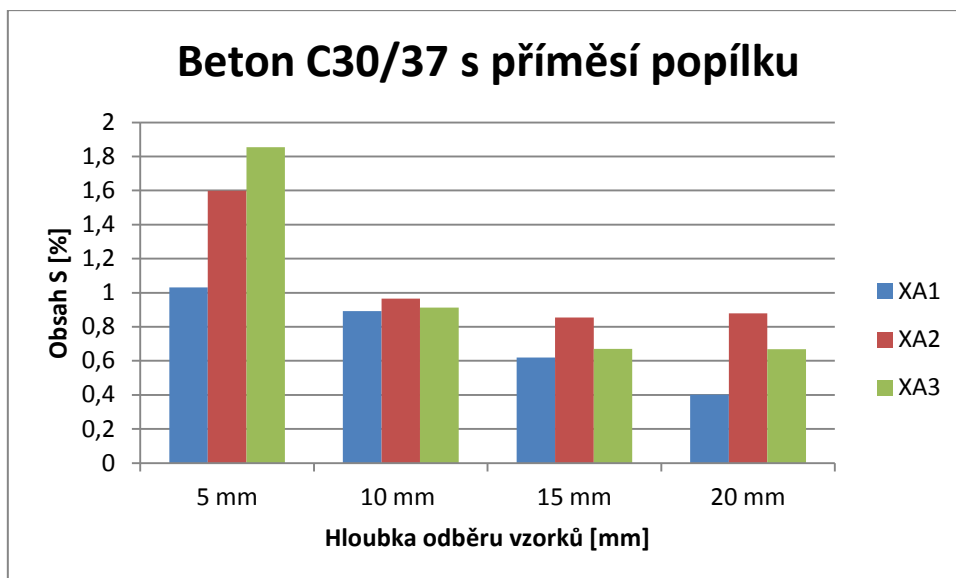
Obr. 19: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 60 dnech



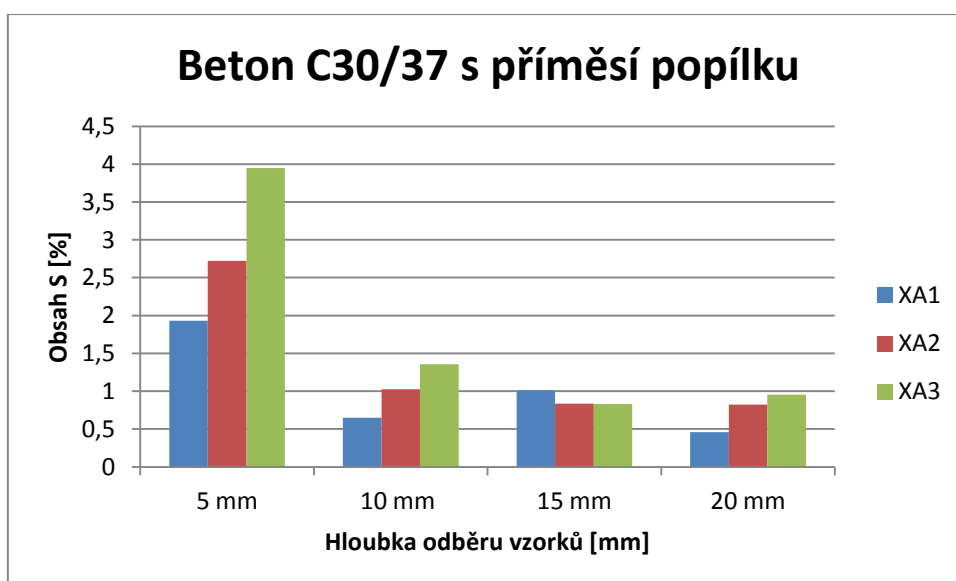
Obr. 20: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 s příměsí mletého vápence vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 30 dnech



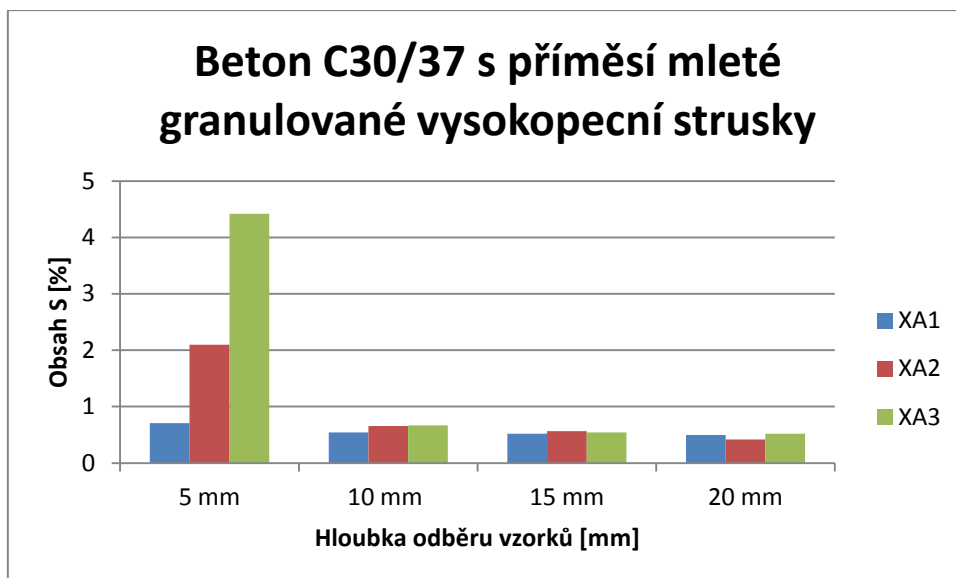
Obr. 21: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 s příměsí mletého vápence vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 60 dnech



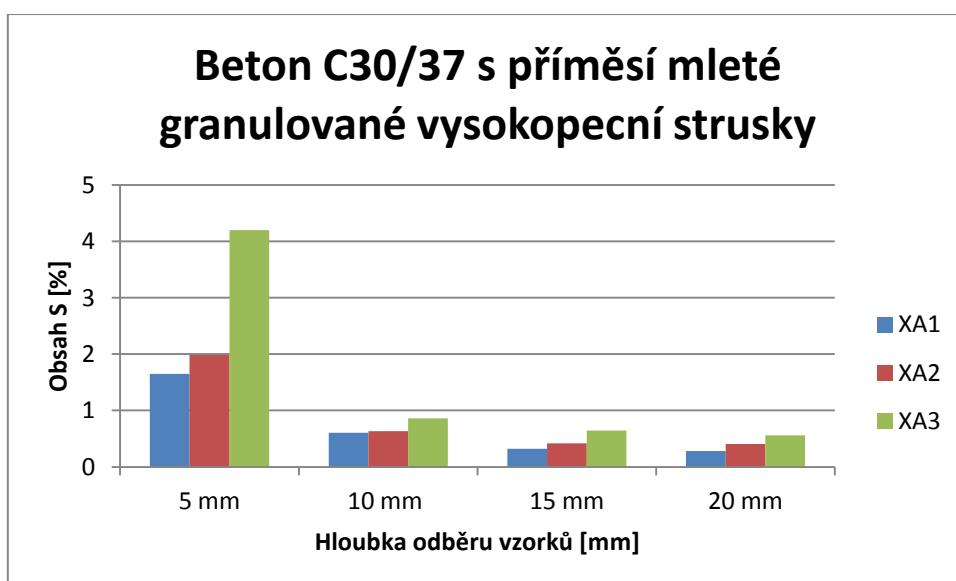
Obr. 22: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 s příměsí popílku vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 30 dnech



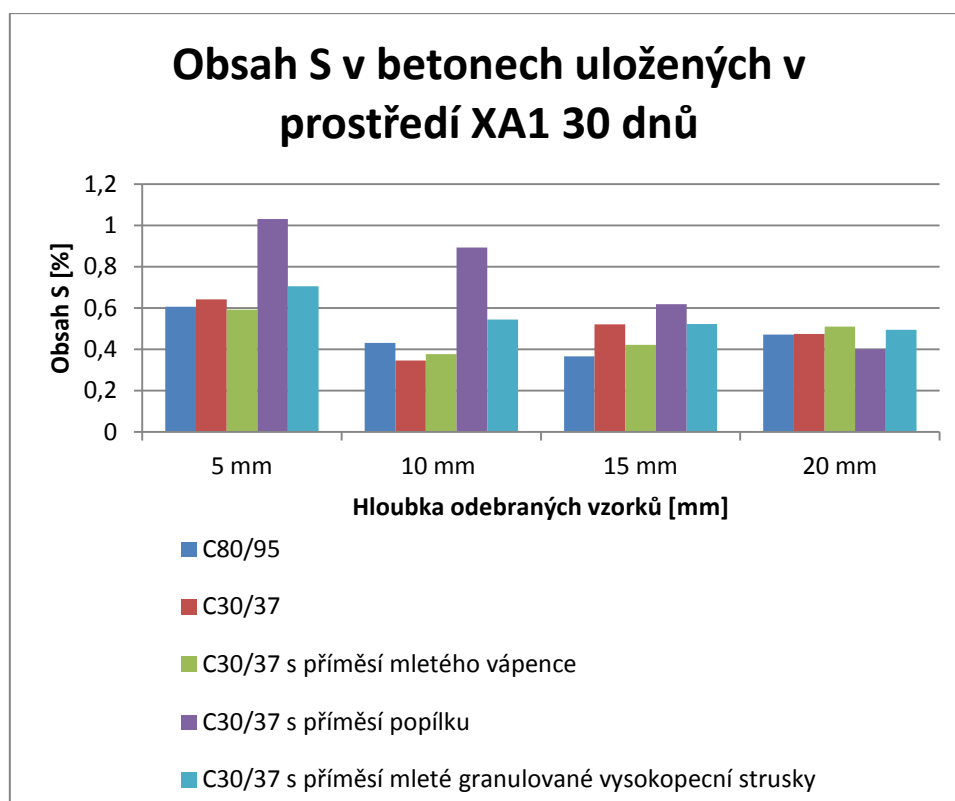
Obr. 23: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 s příměsí popílku vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 60 dnech



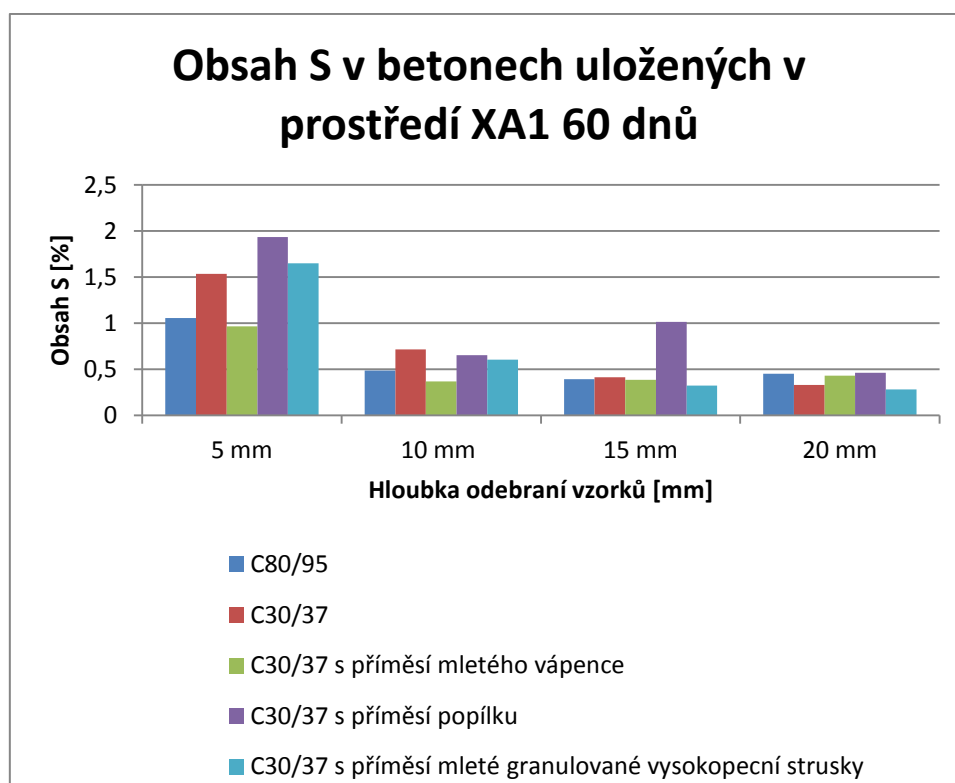
Obr. 24: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 s příměsí mleté granulované vysokopecní strusky vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 30 dnech



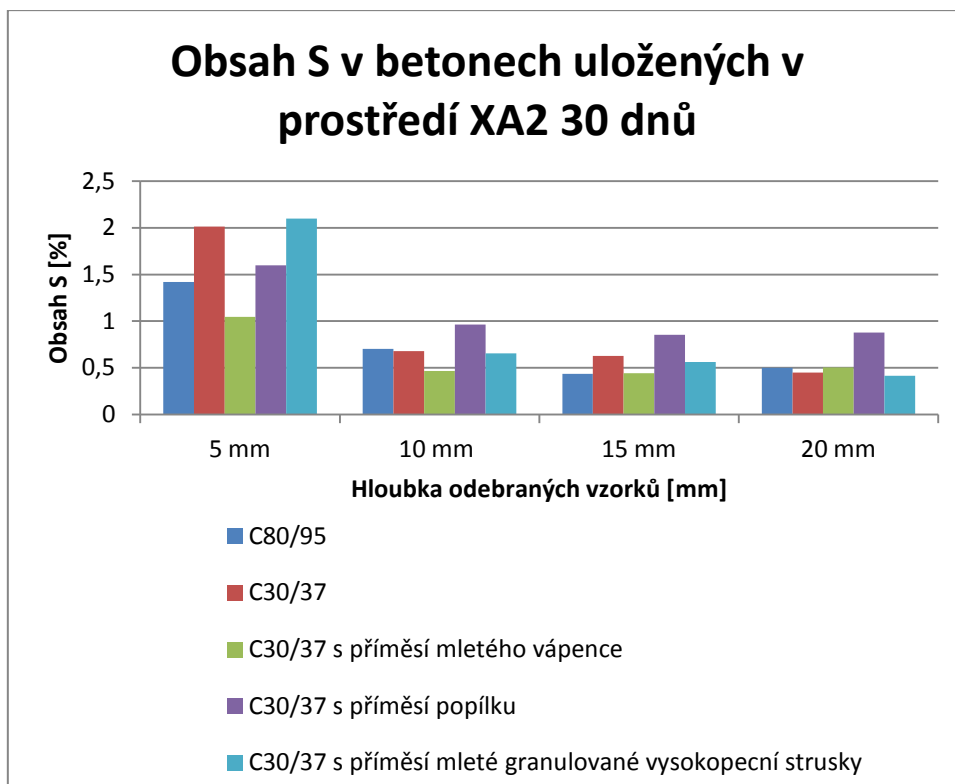
Obr. 25: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 s příměsí mleté granulované vysokopecní strusky vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 60 dnech



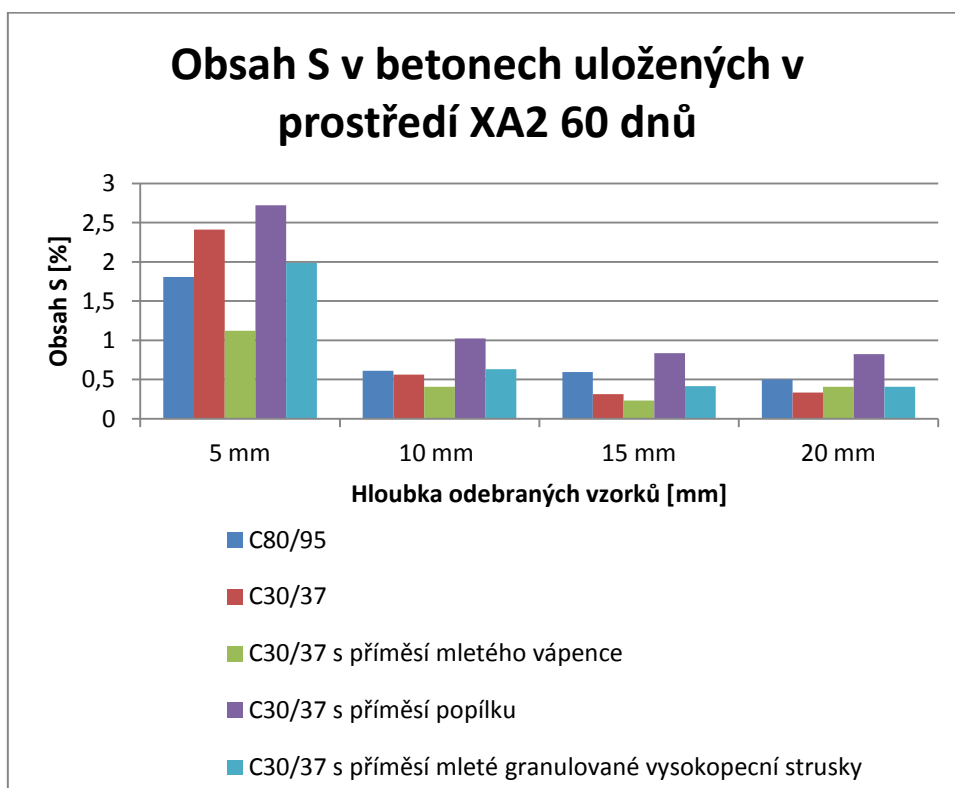
Obr. 26: Rozdíl obsahu síry u jednotlivých tříd betonu v závislosti na hloubce odběru vzorku uložených v prostředí XA1 30 dnů



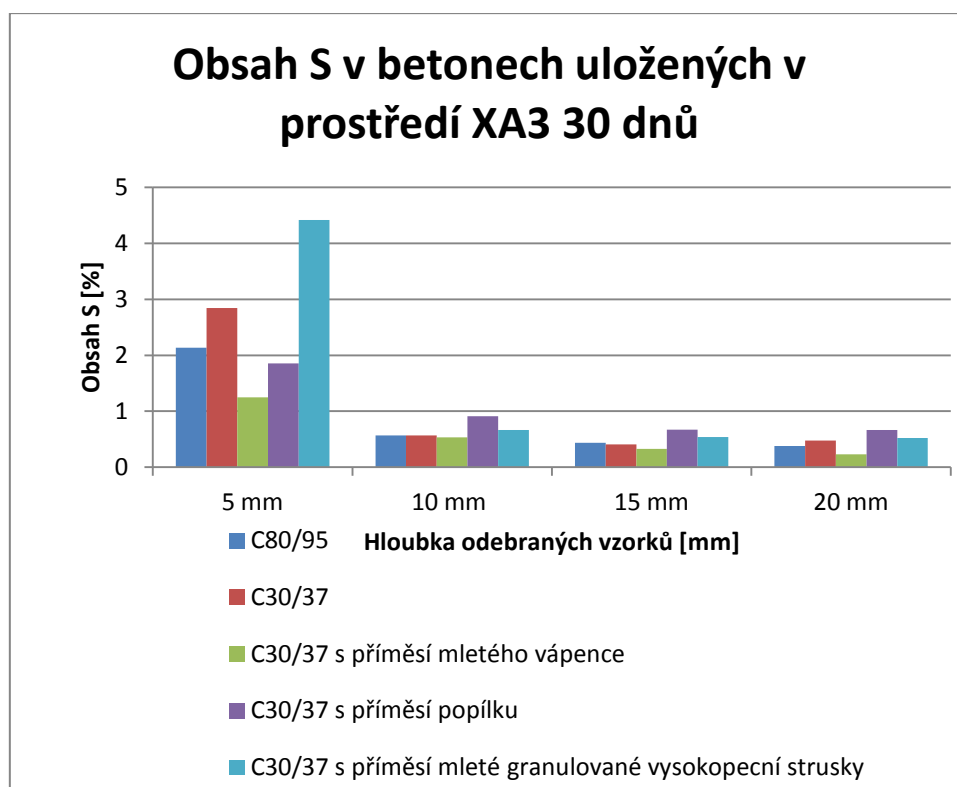
Obr. 27: Rozdíl obsahu síry u jednotlivých tříd betonu v závislosti na hloubce odběru vzorku uložených v prostředí XA1 60 dnů



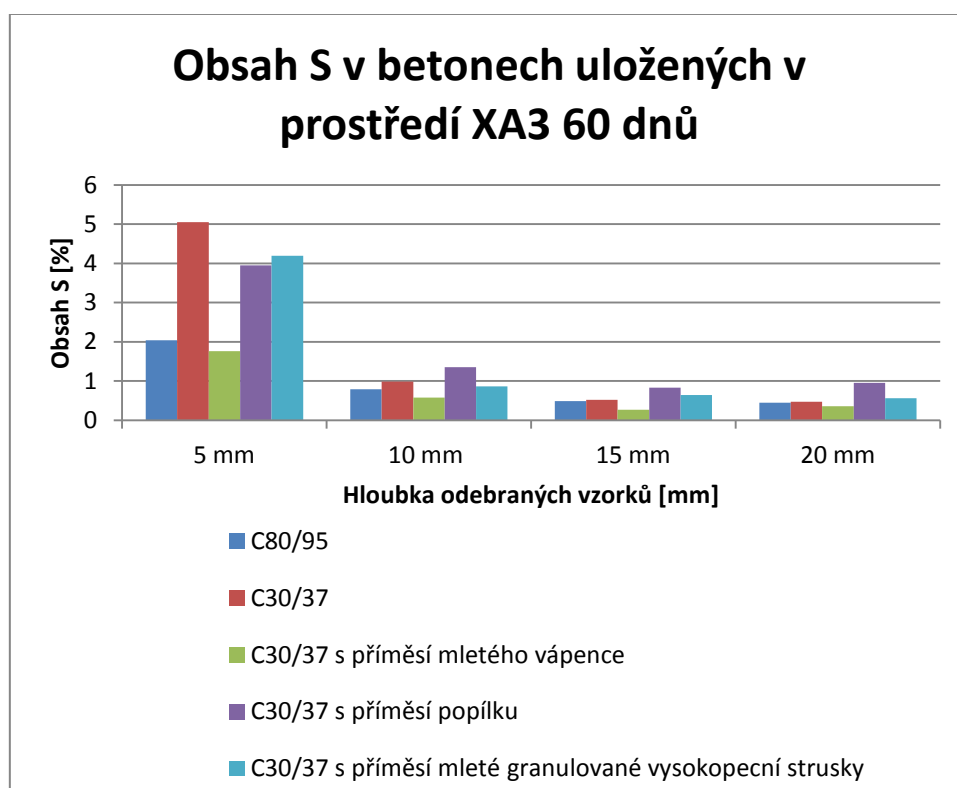
Obr. 28: Rozdíl obsahu síry u jednotlivých tříd betonu v závislosti na hloubce odběru vzorku uložených v prostředí XA2 30 dnů



Obr. 29: Rozdíl obsahu síry u jednotlivých tříd betonu v závislosti na hloubce odběru vzorku uložených v prostředí XA2 60 dnů



Obr. 30: Rozdíl obsahu síry u jednotlivých tříd betonu v závislosti na hloubce odběru vzorku uložených v prostředí XA3 30 dnů



Obr. 31: Rozdíl obsahu síry u jednotlivých tříd betonu v závislosti na hloubce odběru vzorku uložených v prostředí XA3 60 dnů

4.2.2 Síranová koroze cementové pasty

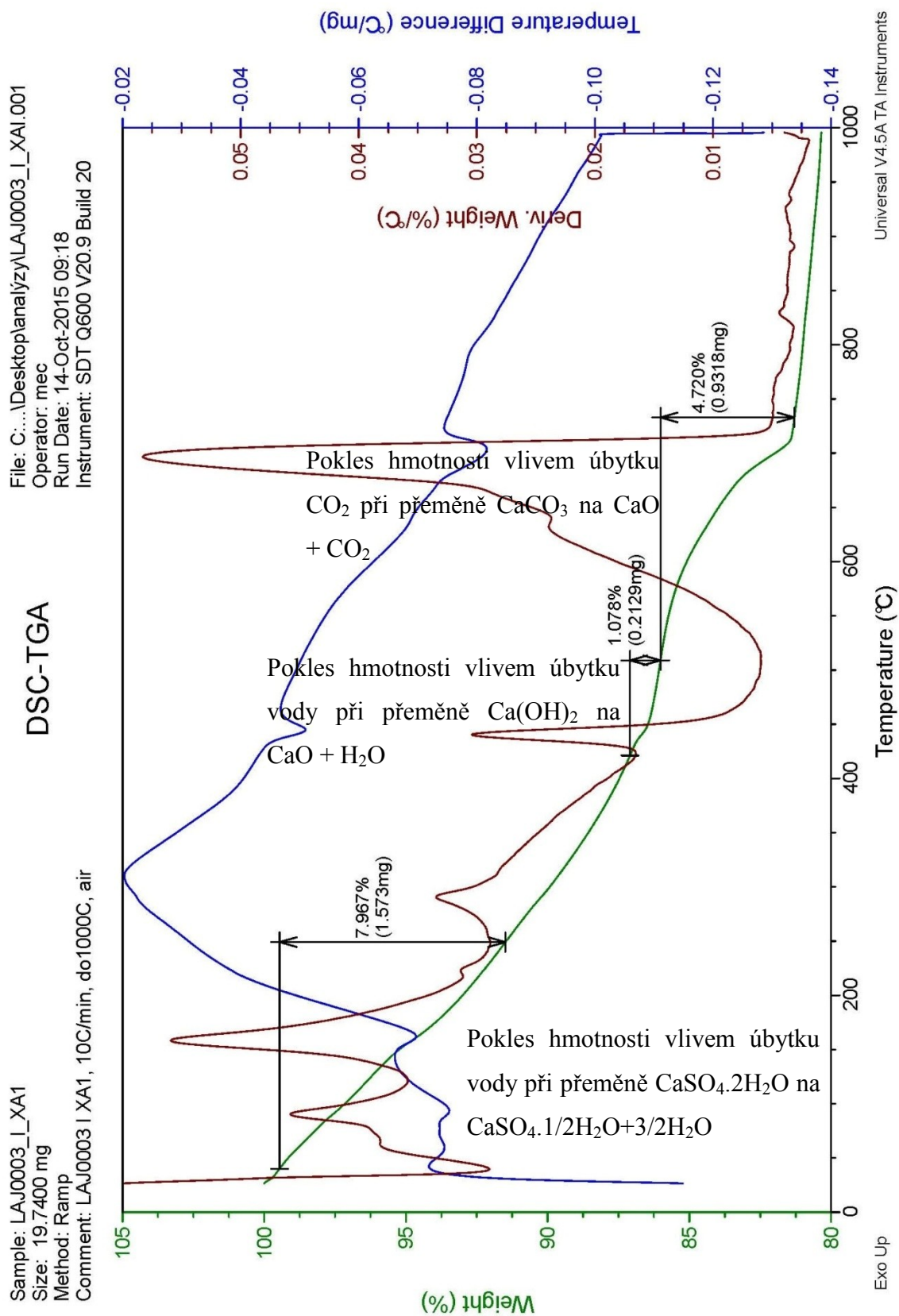
U působení síranů na cementovou pastu je předpokládán stejný chemismus, jako při působení síranů na hydratovaný beton. Při reakcích dochází ke snížení pH cementové pasty v důsledku koroze. Dochází ke snižování množství portlanditu, který se přeměňuje na dihydrát síranu vápenatého (sádrovec). Úměrně s poklesem portlanditu dochází ke zvyšování obsahu korozních produktů [14].

Cementová pasta byla vytvořena ze stejného cementu jako navržené záměsi betonu. Byl dodržen i stejný vodní součinitel a stejný poměr hmotnosti příměsí k hmotnosti cementu. Takto byla připravena cementová pasta dle receptur jednotlivých záměsí. Cementová pasta se nechala 28 dní vyzrát ponořená ve vodě. Poté se ve mlýně rozemlela.

Do zkušební nádoby se odvážilo 10 g pomletého vzorku a nádoba se doplnila 250 ml roztoku kyseliny sírové. Koncentrace kyseliny byla stejná jako u roztoků, do kterých byly uloženy betonové zkušební vzorky. Tedy tak, aby koncentrace síranových iontů v roztoku odpovídaly požadavkům normy ČSN EN 206 [3]. Pro třídu agresivního prostředí XA1 600 mg.l⁻¹, prostředí XA2 3000 mg.l⁻¹ a prostředí XA3 6000 mg.l⁻¹. Namleté vzorky byly vystaveny kyselině 24 hodin. Po tuto dobu byly neustále protřepávány. Po 24 hodinách byly vzorky přefiltrovány, na filtru usazené zbytky namleté cementové pasty vysušeny a podrobeny další chemické analýze.

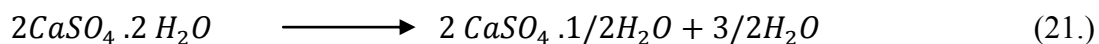
4.2.2.1 Termální analýza vzorků cementové pasty vystavených síranové korozi

Termální analýzou je možné zjistit teplotu, při které se mění fázové složení zkoušených vzorků. Z grafu termální analýzy se odečte množství látky, která při této přeměně uniká do okolí díky poklesu hmotnosti vzorku. Výstup z termální analýzy s popisem úbytků hmotností při jednotlivých přeměnách, které působením síranové koroze ve vzorku probíhají je uveden v (obr. 32). Všechny výstupy z termální analýzy jsou uvedeny v příloze č. 3.



Obr. 32: Ukázka výstupu z termální analýzy

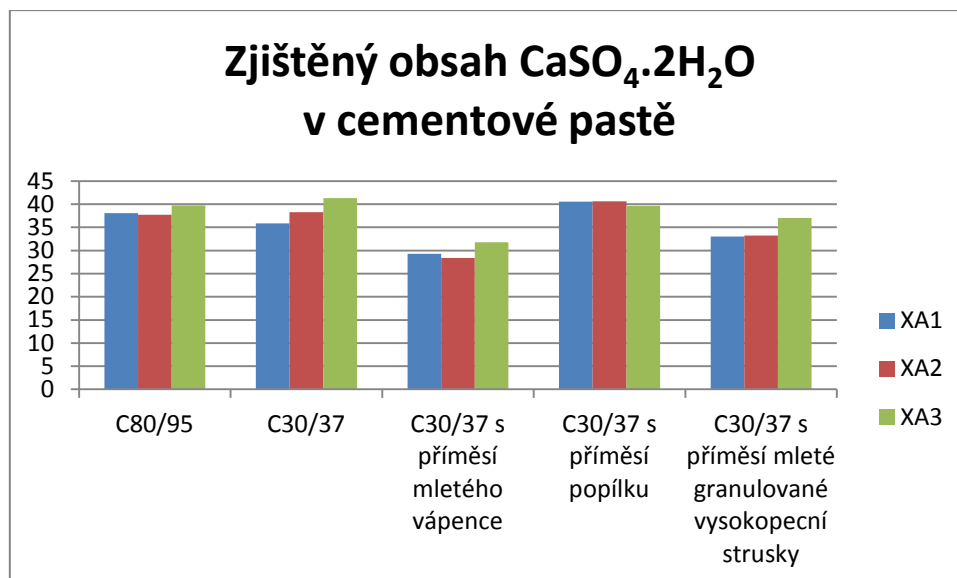
Při teplotě kolem 90 °C začíná přecházet dihydrát síranu vápenatého $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ na hemihydrát síranu vápenatého $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$. K této přeměně dochází přibližně do teploty 250 °C. Tento proces lze vyjádřit:



Z grafu termální analýzy je možné odečíst množství vody, která vznikne při této reakci a poté z tohoto množství vypočíst množství původně přítomného $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ve vzorku. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v (tab. 16). Ve vzorku ovšem nemusí být pouze $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ale také například ettringit, který má ve struktuře také vázanou vodu a může docházet i k odpařování této vody. Proto toto množství není zcela přesné.

Tab. 16: Zjištěný obsah $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ v cementové pastě degradované síranovou korozí

Označení	Celková hmotnost vzorku [mg]	Hmotnost H_2O [mg]	Hmotnost $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [mg]	% hmotnosti vzorku [%]
I - XA1	19,740	1,573	7,517	38,08
I - XA2	19,436	1,534	7,330	37,71
I - XA3	19,585	1,627	7,775	39,70
II - XA1	19,738	1,481	7,077	35,85
II - XA2	19,962	1,598	7,636	38,25
II - XA3	19,855	1,716	8,200	41,30
III - XA1	20,838	1,277	6,102	29,28
III - XA2	19,986	1,186	5,667	28,36
III - XA3	19,503	1,298	6,202	31,80
IV - XA1	20,517	1,741	8,319	40,55
IV - XA2	20,634	1,755	8,386	40,64
IV - XA3	20,382	1,692	8,085	39,67
V - XA1	19,875	1,373	6,561	33,01
V - XA2	19,902	1,383	6,609	33,21
V - XA3	20,160	1,561	7,459	37,00



Obr. 33: Zjištěný obsah $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ v cementové pastě degradované síranovou korozi

Při teplotě mezi 400 – 500 °C dochází k přeměně portlanditu. Z portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se uvolňuje voda a vzniká CaO . Tato reakce se zapisuje:

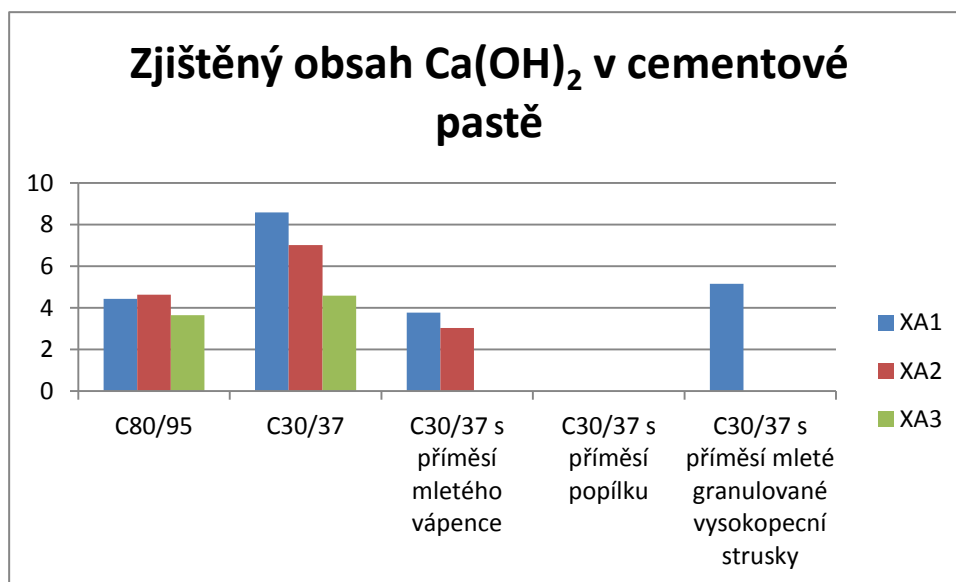


Množství portlanditu ve vzorku je uvedeno v (tab. 17).

Z výsledků je patrné, že u vzorků vystaveným síranové korozi dochází ke snižování množství portlanditu, který při síranové korozi se přeměňuje na dihydrát síranu vápenatého. Dále je možné sledovat vliv koncentrace síranových iontů na množství portlanditu. Se zvyšujícím se množstvím síranů dochází k poklesu množství portlanditu.

Tab. 17: Zjištěný obsah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v cementové pastě degradované síranovou korozí

Označení	Celková hmotnost vzorku [mg]	Hmotnost H_2O [mg]	Hmotnost $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [mg]	% hmotnosti vzorku [%]
I - XA1	19,740	0,213	0,876	4,44
I - XA2	19,436	0,219	0,901	4,64
I - XA3	19,585	0,174	0,714	3,64
II - XA1	19,738	0,412	1,693	8,58
II - XA2	19,962	0,341	1,402	7,02
II - XA3	19,855	0,221	0,910	4,58
III - XA1	20,838	0,191	0,786	3,77
III - XA2	19,986	0,147	0,605	3,03
III - XA3	19,503	0,000	0,000	0,00
IV - XA1	20,517	0,000	0,000	0,00
IV - XA2	20,634	0,000	0,000	0,00
IV - XA3	20,382	0,000	0,000	0,00
V - XA1	19,875	0,249	1,025	5,16
V - XA2	19,902	0,000	0,000	0,00
V - XA3	20,160	0,000	0,000	0,00



Obr. 34: Zjištěný obsah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v cementové pastě degradované síranovou korozí

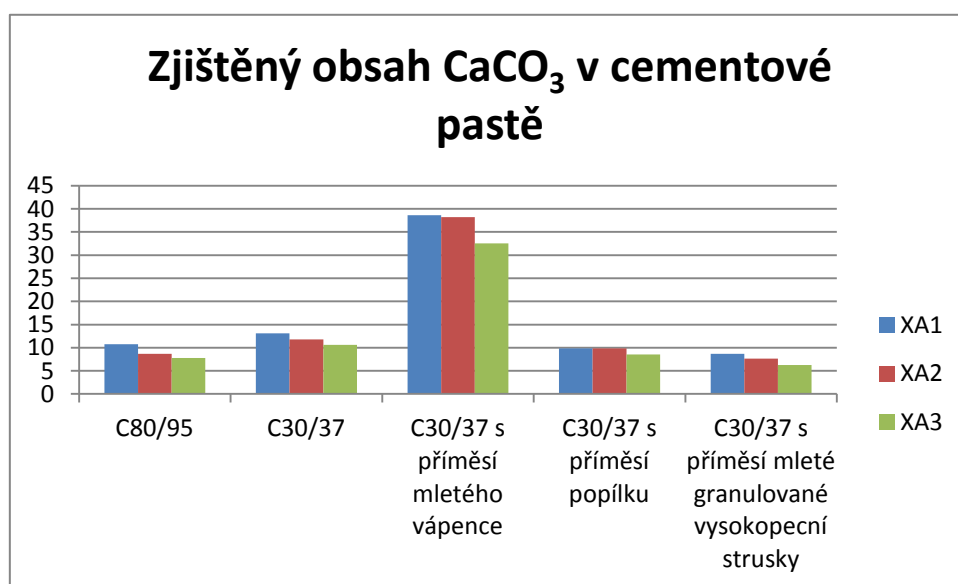
Při teplotě od 500 do 700 °C dochází k rozkladu CaCO_3 na CaO a CO_2 dle rovnice:



Výsledné množství CaCO_3 ve vzorku napadeného síranovou korozí je uvedeno v (tab. 18).

Tab. 18: Zjištěný obsah CaCO_3 v cementové pastě degradované síranovou korozí

Označení	Celková hmotnost vzorku [mg]	Hmotnost CO_2 [mg]	Hmotnost CaCO_3 [mg]	% hmotnosti vzorku [%]
I - XA1	19,740	0,932	2,119	10,74
I - XA2	19,436	0,744	1,691	8,70
I - XA3	19,585	0,671	1,526	7,79
II - XA1	19,738	1,135	2,581	13,08
II - XA2	19,962	1,032	2,347	11,76
II - XA3	19,855	0,928	2,109	10,62
III - XA1	20,838	3,540	8,051	38,63
III - XA2	19,986	3,359	7,639	38,22
III - XA3	19,503	2,788	6,341	32,51
IV - XA1	20,517	0,889	2,021	9,85
IV - XA2	20,634	0,892	2,029	9,83
IV - XA3	20,382	0,764	1,738	8,53
V - XA1	19,875	0,760	1,727	8,69
V - XA2	19,902	0,665	1,513	7,60
V - XA3	20,160	0,552	1,255	6,23



Obr. 35: Zjištěný obsah CaCO_3 v cementové pastě degradované síranovou korozí

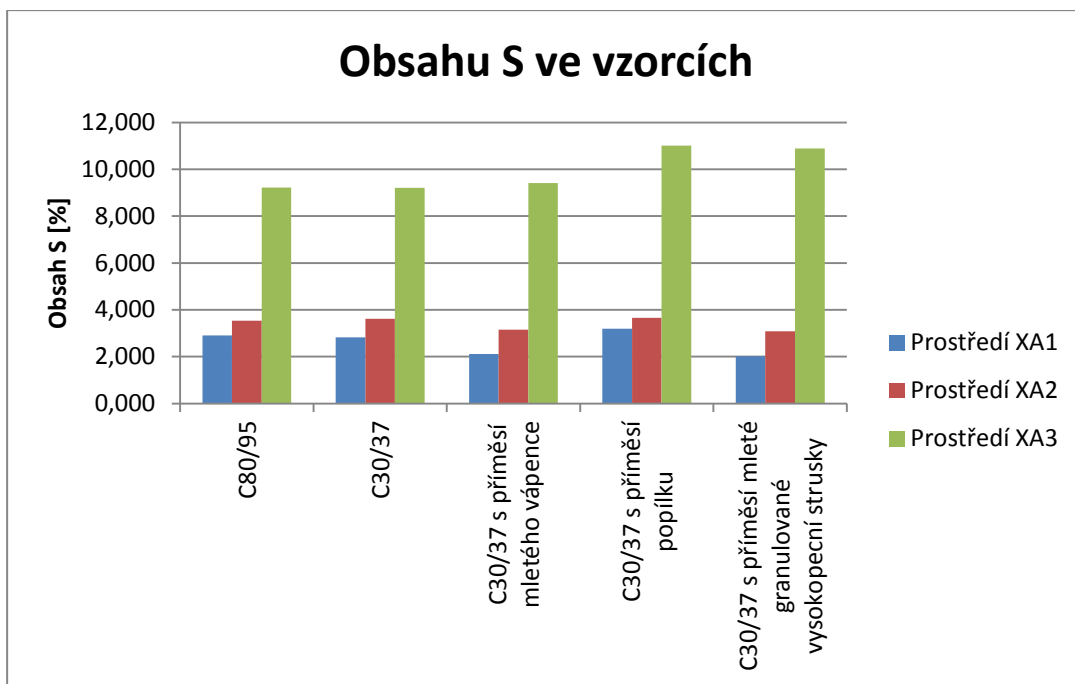
Patrný je největší obsah CaCO_3 v cementové pastě s příměsí mletého vápence, také lze pozorovat snižující se množství CaCO_3 v pastě vystavené nejvíce agresivnímu prostředí XA3.

4.2.2.2 Analýza vzorků cementové pasty napadené síranovou korozí pomocí XRF spektrometrie

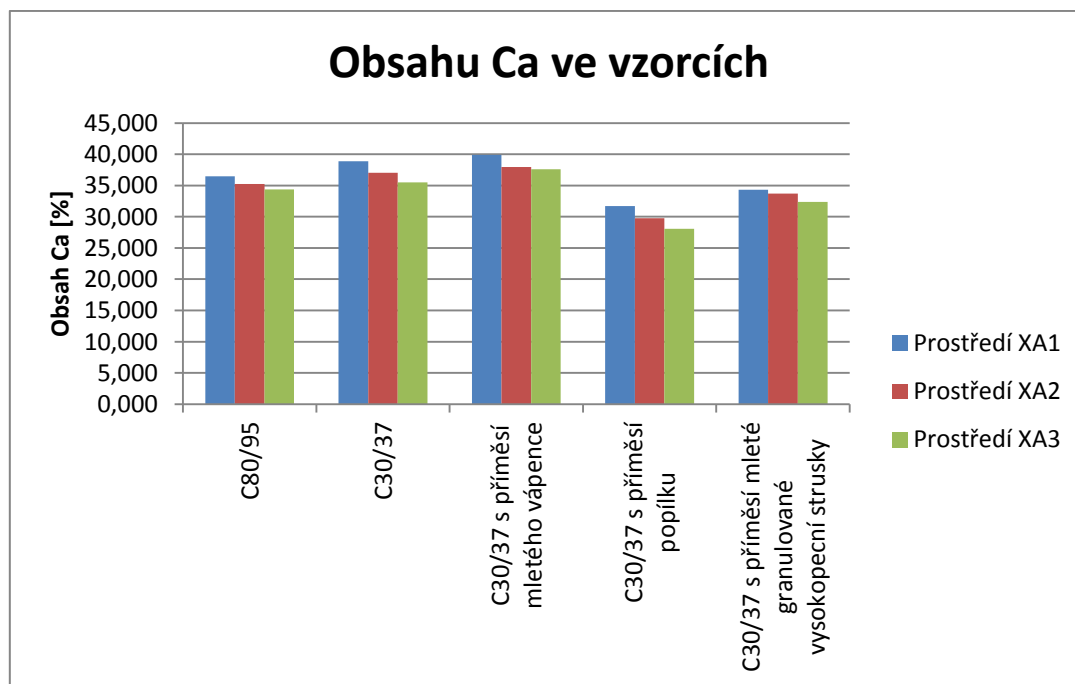
Pomleté vzorky cementové pasty byly podrobeny analýze pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie. Výsledkem analýzy je zjištění chemického složení vzorků. Sledován byl obdobně jako u betonu obsah síry ve vzorcích a také obsah vápníku. Kompletní naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 4. Množství síry a vápníku jednotlivých cementových past je uvedeno v (tab. 19).

Tab. 19: Zjištěný obsah CaCO_3 v cementové pastě degradované síranovou korozí

Záměs	Prostředí uložení	S [%]	Ca [%]
I	XA1	2,914	36,457
	XA2	3,531	35,227
	XA3	9,225	34,394
II	XA1	2,819	38,895
	XA2	3,624	37,020
	XA3	9,206	35,518
III	XA1	2,117	39,918
	XA2	3,155	37,972
	XA3	9,409	37,626
IV	XA1	3,199	31,696
	XA2	3,659	29,765
	XA3	11,012	28,066
V	XA1	2,022	34,340
	XA2	3,083	33,691
	XA3	10,885	32,382



Obr. 36: Zjištěný obsah S [%] v cementové pastě degradované síranovou korozí



Obr. 37: Zjištěný obsah S [%] v cementové pastě degradované síranovou korozí

Ve výsledcích lze pozorovat rostoucí obsah síry u vzorků vystavených agresivnímu prostředí s vyšším obsahem síranů. A naopak klesající obsah vápníku. Klesající obsah vápníků je zřejmě způsobeno tím, že část vápníku se rozpustila a následně se odfiltrovala.

4.2.2.3 Maximální možný příjem SO_4^{2-} iontů cementových past

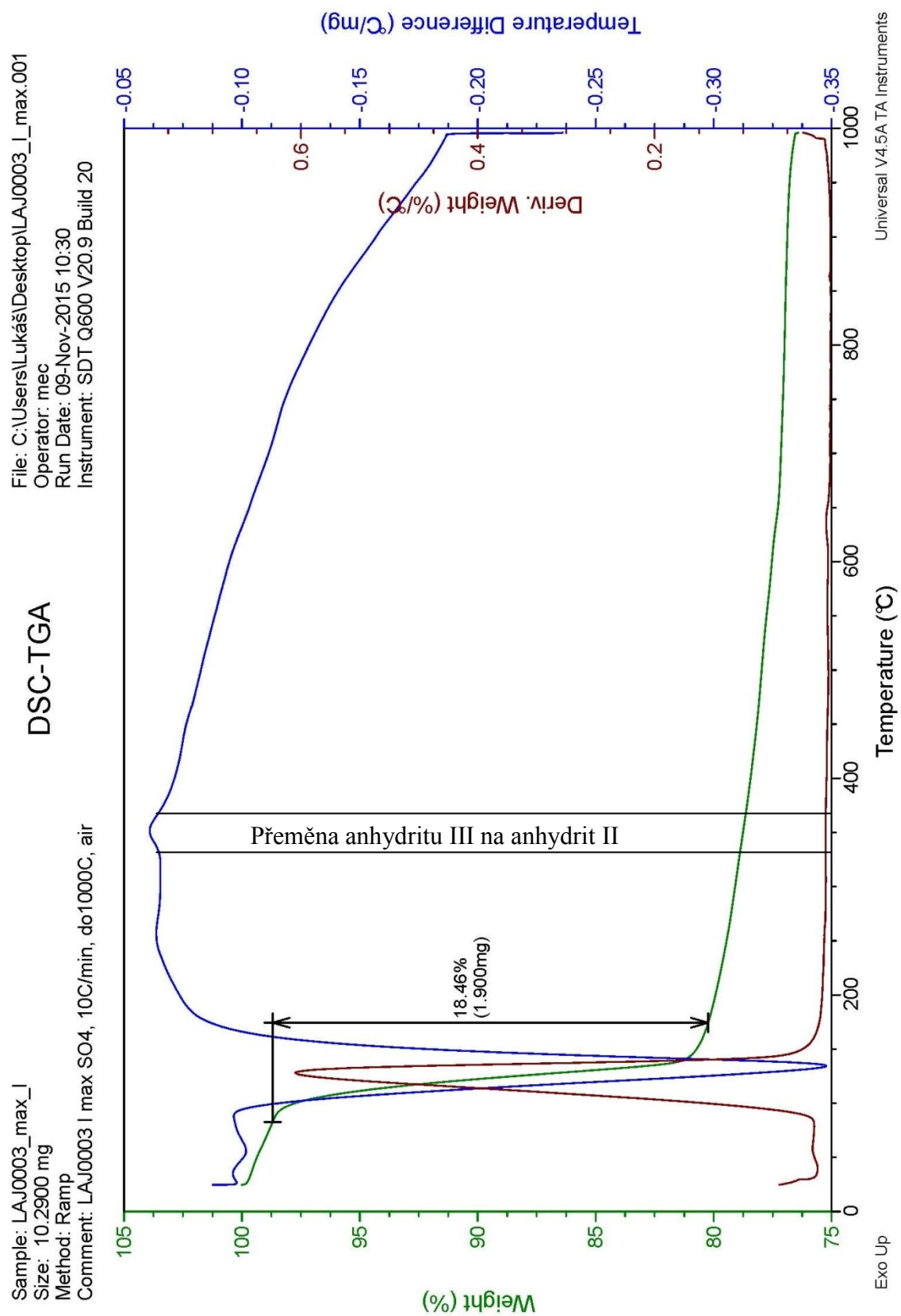
Do zkušební nádoby bylo naváženo 5 g rozemleté hydratované cementové pasty. K této pastě bylo přidáno 250 ml roztoku kyseliny sírové. Bylo změřeno jeho pH. Zkušební nádoba se 24 hodin protřepávala a poté bylo opět změřeno pH roztoku. Pokud se pH změnilo, bylo přidáno množství kyseliny sírové tak, aby pH opět pokleslo na původní hodnotu, po 24 hodinách se pH opět změřilo a v případě jeho změny bylo opět upraveno přidáním kyseliny sírové do roztoku. V tomto postupu se pokračovalo, dokud nepřestalo k výrazné změně pH. Měřené pH je zaznamenáno v (tab. 20).

Roztoky se poté přefiltrovaly a usazené zbytky na filtračním papíru vysušili. Na těchto vzorcích poté byla provedena termální analýza. Na termální analýze je patrná přeměna původně přítomného dihydrátu síranu vápenatého $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ na hemihydrát síranu vápenatého $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ spojená s úbytkem hmotnosti prostřednictvím odpařující se vody. Množství odpařující se vody a množství síranů je uvedeno v (tab. 21).

Výsledky termální analýzy jsou uvedeny v příloze č. 5. Vzorový výstup termální analýzy je znázorněn na (obr. 38). Ve výsledcích je patrná i přeměna anhydritu III na anhydrit II, která probíhá při teplotě kolem 400°C . Tato změna není spojena s poklesem hmotnosti.

Tab. 20: Změřené pH a množství přidané kyseliny sírové

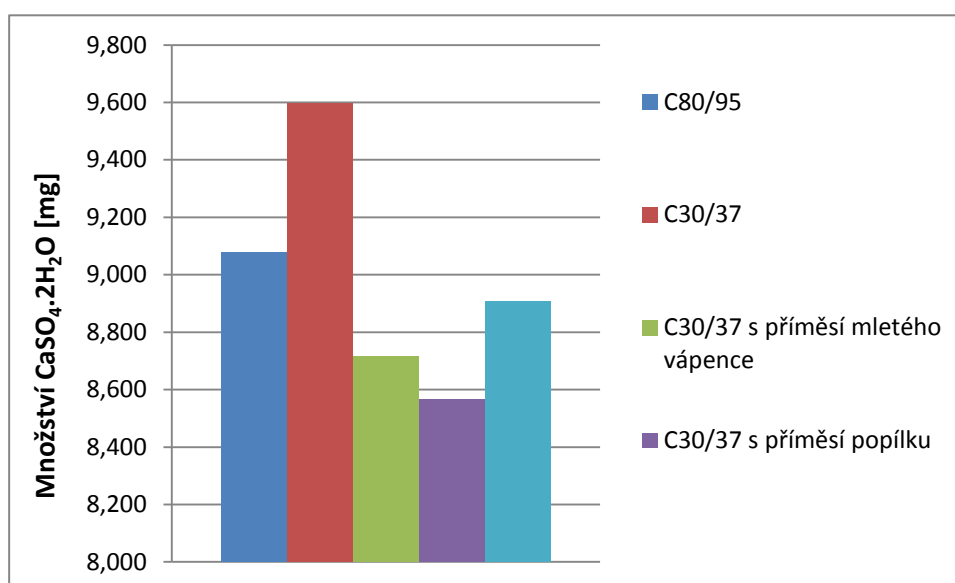
	26.10.2015		27.10.2015			29.10.2015			30.10.2015
Označení	Množství použité kyseliny [g]	pH	pH	Množství přidané kyseliny [g]	pH změřené po přidání kyseliny	pH	Množství přidané kyseliny [g]	pH změřené po přidání kyseliny	ph
I	1,3	1,81	11,64	1,3	1,51	4,35	1,0	1,85	1,91
II	1,3	1,81	11,97	1,3	1,53	5,25	1,0	2,10	2,20
III	1,3	1,81	11,83	1,3	1,44	5,46	1,0	1,70	1,81
IV	1,3	1,81	11,03	1,3	1,41	5,20	1,0	2,27	2,32
V	1,3	1,81	11,74	1,3	1,43	5,22	1,0	1,79	1,81



Obr. 38: Ukázka výstupu z termální analýzy

Tab. 21: Zjištěný maximální možný příjem $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ do cementové pasty

Označení	Celková hmotnost vzorku [mg]	Hmotnost H_2O [mg]	Hmotnost $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [mg]	% hmotnosti vzorku [%]
I	10,290	1,900	9,079	88,23
II	10,452	2,008	9,595	91,80
III	10,105	1,824	8,716	86,25
IV	9,869	1,793	8,568	86,82
V	10,770	1,864	8,907	82,70

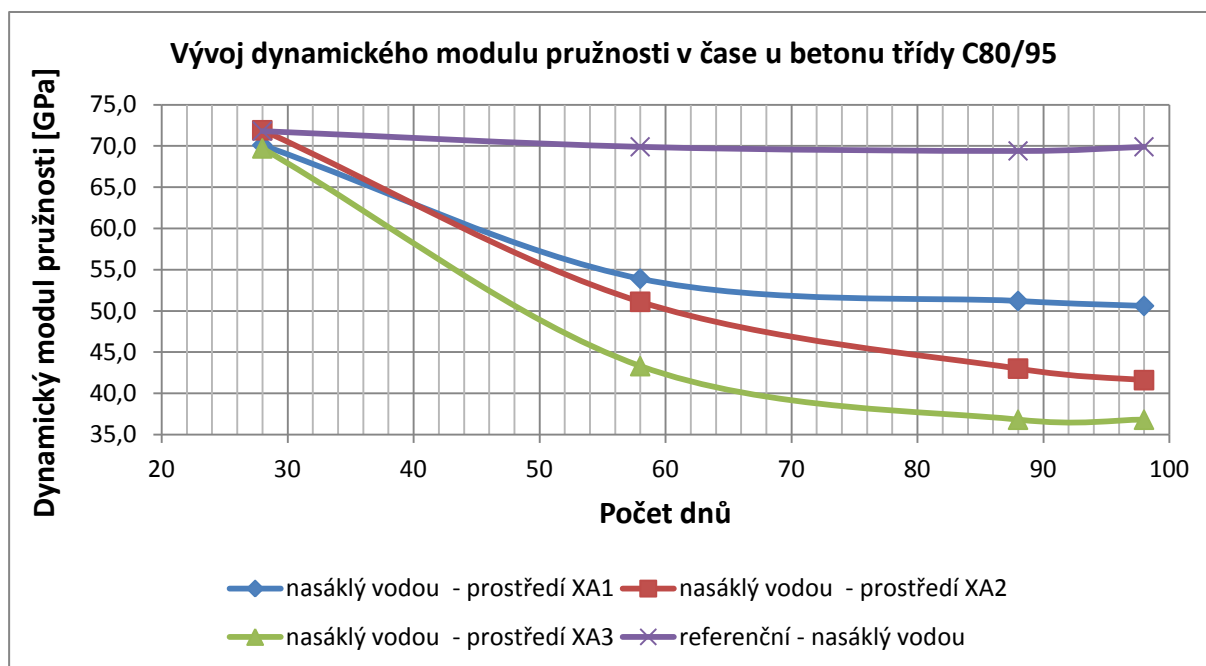


Obr. 39: Maximální možný příjem síranů jednotlivých typů betonů

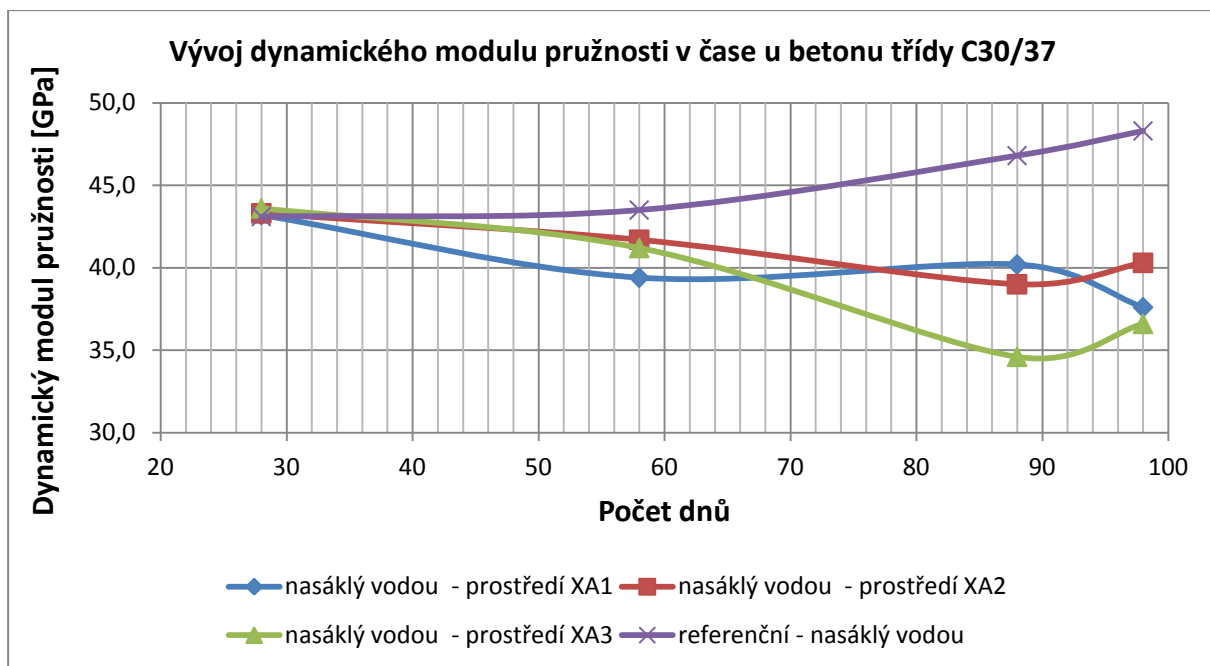
Z výsledku vyplývá, že největší množství sádrovce obsahuje beton třídy C30/37 bez příměsí. Naopak nejmenší množství sádrovce obsahuje beton třídy C30/37 s příměsí popílku.

4.2.3 Vliv síranové koroze na dynamický modul pevnosti betonu

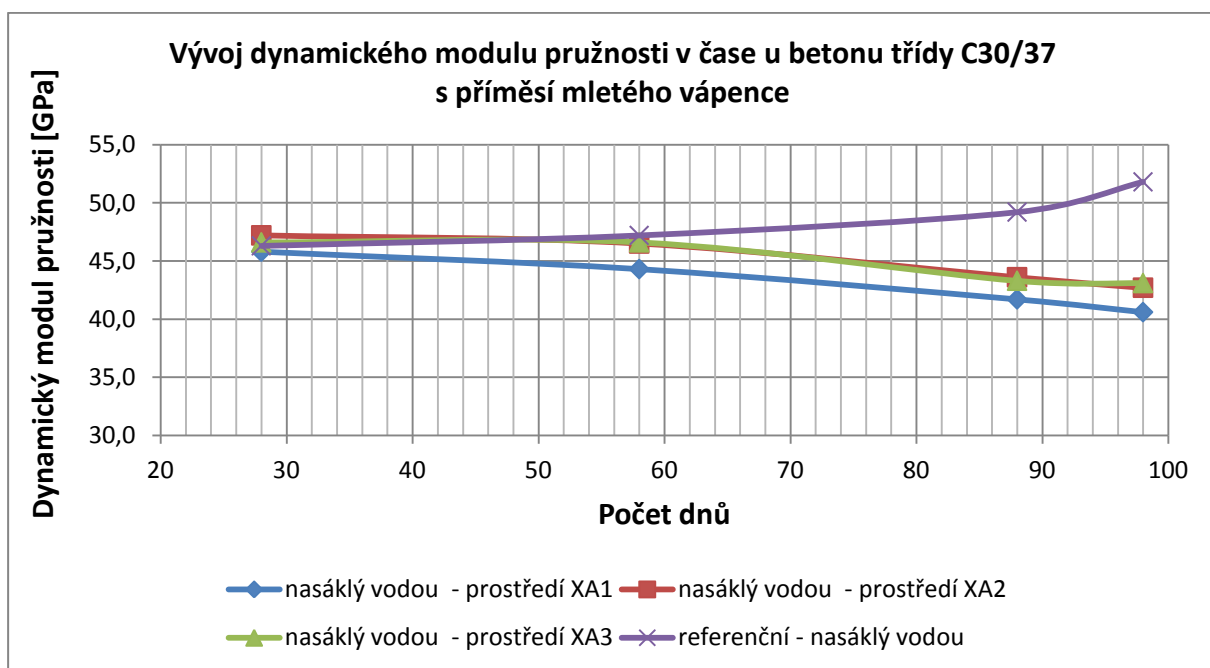
Dynamický modul pružnosti byl stanoven na betonových zkušebních tělesech tvaru krychle o rozměru 100 x 100 x 100 mm ultrazvukovou impulzovou metodou. Dynamický modul pružnosti byl stanoven na vzorcích po 28 dnech uložených pod vodou, poté po 30, 60 a 70 dnech uložených v agresivním prostředí obsahujícím sírany. Sledován byl vliv síranové koroze na změnu dynamického modulu pružnosti po určitém čase. Naměřené výsledky jsou uvedeny v příloze č. 6 a graficky znázorněny (obr. 40 – 44).



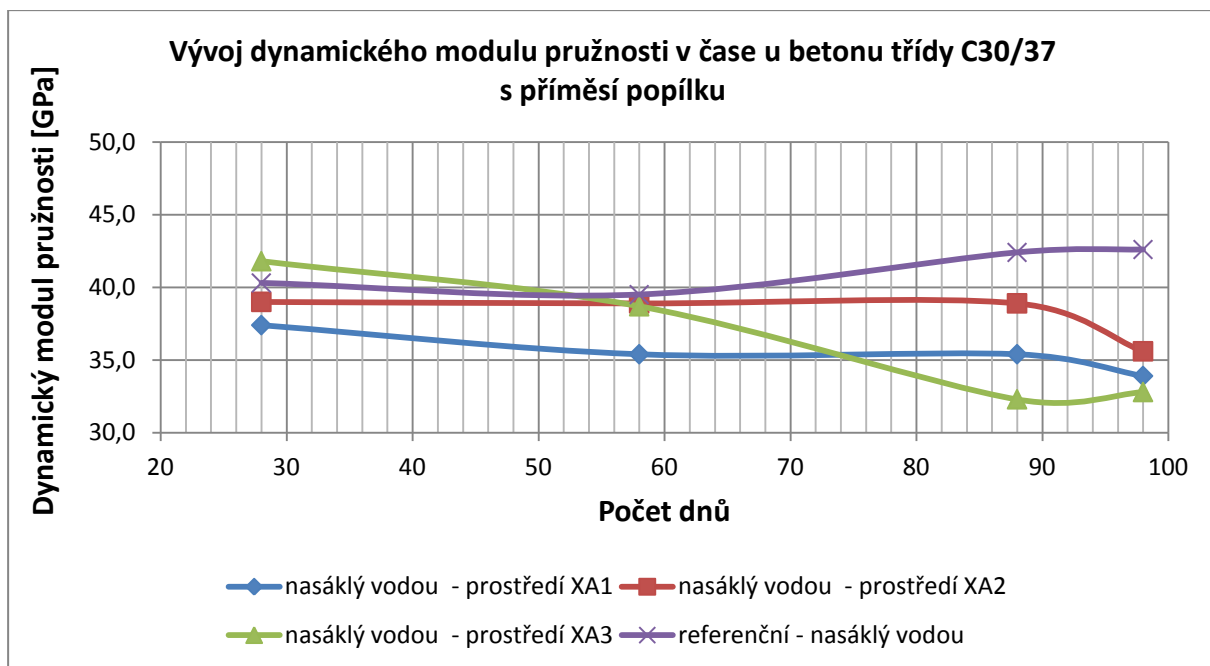
Obr. 40: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase u betonu třídy C80/95 v závislosti na prostředí uložení



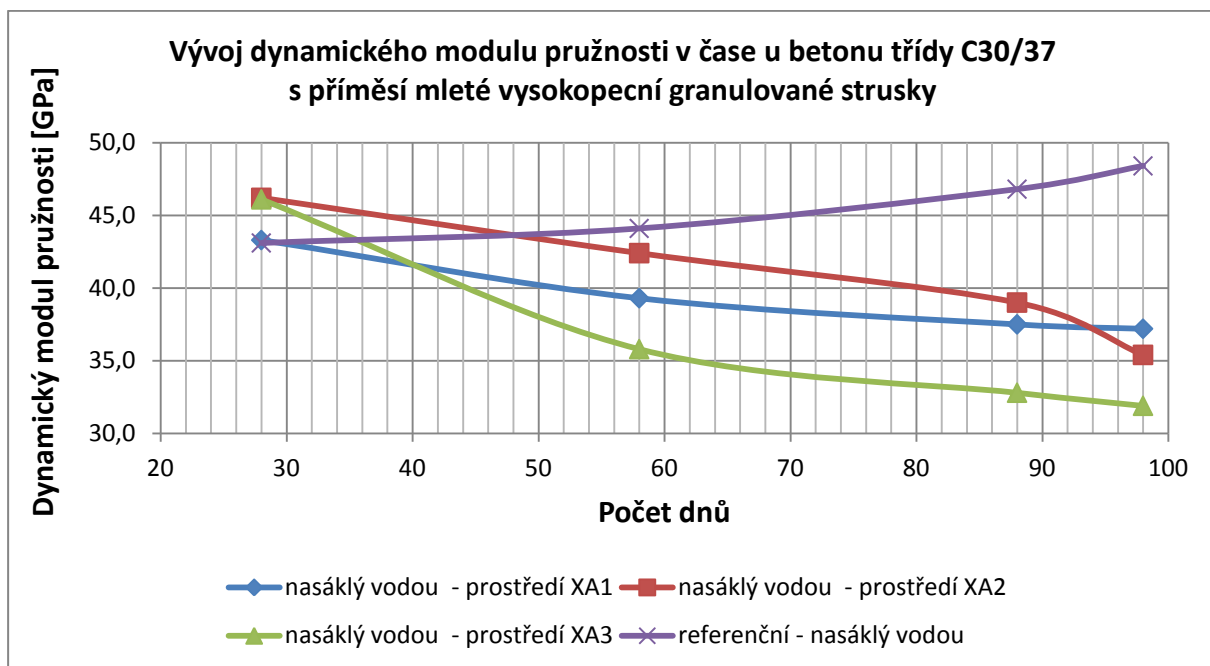
Obr. 41: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase u betonu třídy C30/37 v závislosti na prostředí uložení



Obr. 42: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase u betonu třídy C30/37 s příměsí mletého vápence v závislosti na prostředí uložení



Obr. 43: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase u betonu třídy C30/37 s příměsí popílku v závislosti na prostředí uložení



Obr. 44: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase u betonu třídy C30/37 s příměsí mleté vysokopecní granulované strusky v závislosti na prostředí uložení

Z výsledků je patrné, že zatímco dynamický modul pružnosti u referenčních vzorků neklesá a má spíše rostoucí tendenci, tak vzorky uložené v agresivním prostředí vykazují pokles dynamického modulu pružnosti.

4.2.4 Vliv síranové koroze na pevnost betonu v tlaku

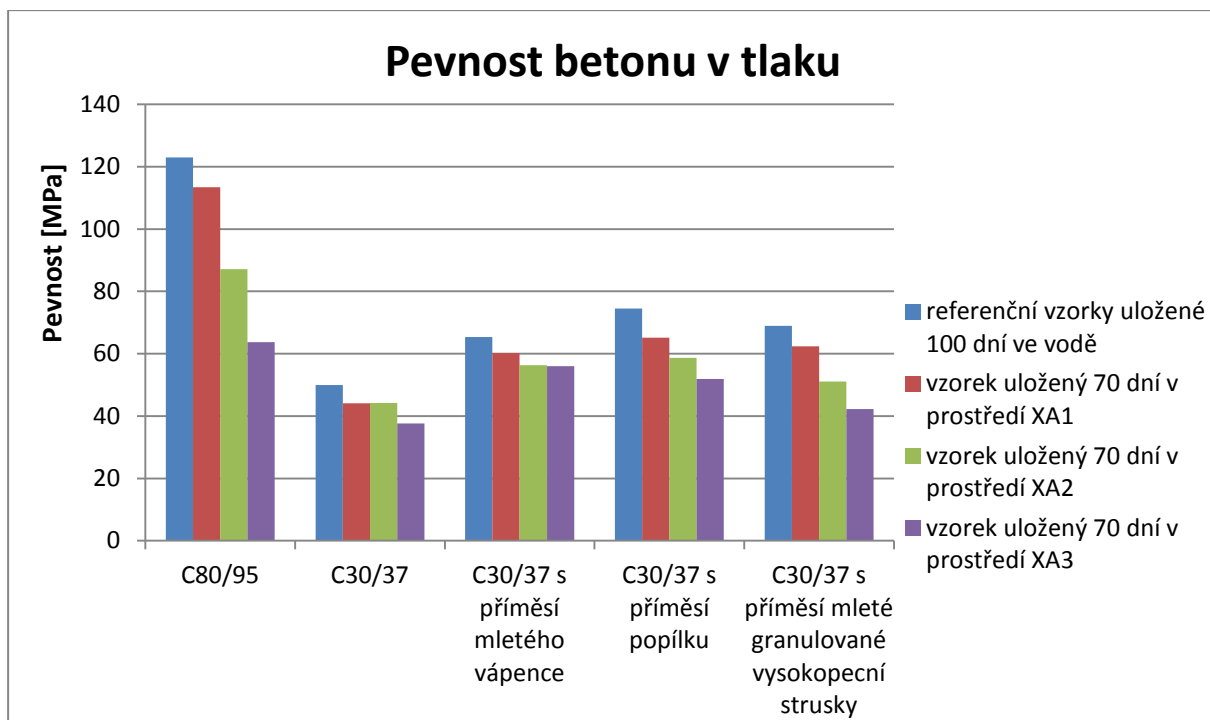
Vzorky byly podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku po 70 dnech uložení v agresivním prostředí XA1 – XA3 bohatém na sírany. Zkouška pevnosti v tlaku byla také provedena na referenčních vzorcích uložených stejnou dobu ve vodě. Sledován byl rozdíl mezi pevností referenčních vzorků a pevností vzorků napadených síranovou korozí.

Z výsledků lze vyčíst, že vlivem síranové koroze dochází k poklesu pevnosti vzorků. Je patrný rozdíl ve vlivu koncentrace SO_4^{2-} iontů na pevnost betonu v tlaku. Agresivní prostředí XA1 s nejnižším obsahem síranů má na pevnost v tlaku menší vliv, než prostředí XA3 s vyšší koncentrací síranů.

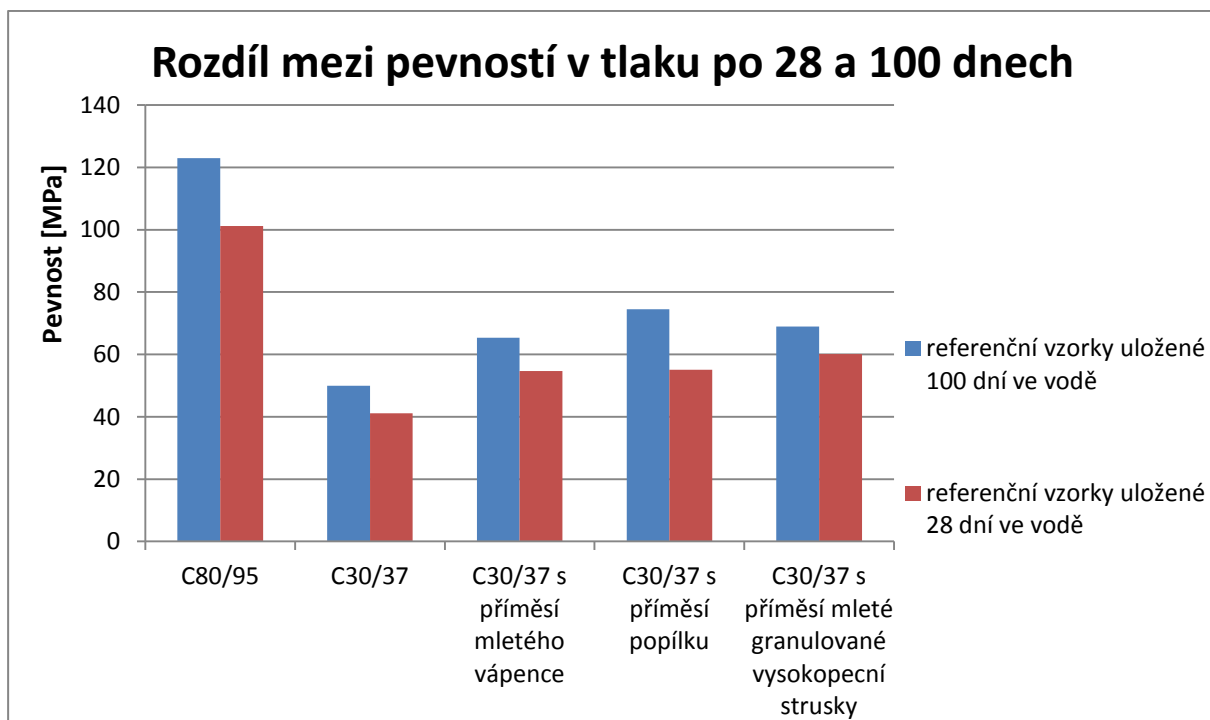
Výsledné pevnosti v tlaku jsou uvedeny v (tab. 22) a graficky znázorněny na (obr. 45).

Tab. 22: Pevnost betonu v tlaku

Vzorek	Uložení vzorku	Rozměry [mm]		Síla při porušení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
		a	b			
I-2A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA1	100,89	100,91	1154,4	113,4	
I-3A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA2	101,66	101,54	898,8	87,1	
I-4A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA3	99,83	99,63	633,1	63,7	
I-5A	referenční vzorky uložené 100 dní ve vodě	100,10	100,75	1210,2	120,0	123,0
I-5B		100,11	99,77	1259,2	126,1	
I-5C		100,09	100,22	1232,8	122,9	
II-2A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA1	100,77	101,68	451,8	44,1	
II-3A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA2	100,88	101,36	451,8	44,2	
II-4A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA3	101,09	100,19	380,9	37,6	
II-5A	referenční vzorky uložené 100 dní ve vodě	100,38	100,19	488,4	48,6	49,9
II-5B		100,97	100,12	518,8	51,3	
II-5C		100,12	100,13	500,6	49,9	
III-2A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA1	100,73	100,63	610,6	60,2	
III-3A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA2	100,56	101,37	574,2	56,3	
III-4A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA3	100,47	101,66	572,2	56,0	
III-5A	referenční vzorky uložené 100 dní ve vodě	100,31	99,96	667,4	66,6	65,3
III-5B		100,23	101,13	654,1	64,5	
III-5C		100,58	100,08	653,1	64,9	
IV-2A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA1	100,53	101,31	663,0	65,1	
IV-3A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA2	101,33	101,04	600,6	58,7	
IV-4A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA3	102,07	101,81	539,6	51,9	
IV-5A	referenční vzorky uložené 100 dní ve vodě	100,34	99,24	742,2	74,5	74,4
IV-5B		100,15	100,66	749,1	74,3	
IV-5C		99,83	100,16	744,7	74,5	
V-2A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA1	100,88	101,54	638,8	62,4	
V-3A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA2	101,68	101,69	527,6	51,0	
V-4A	vzorek uložený 70 dní v prostředí XA3	102,60	102,26	443,0	42,2	
V-5A	referenční vzorky uložené 100 dní ve vodě	100,47	99,90	694,3	69,1	68,9
V-5B		100,34	100,22	693,8	69,0	
V-5C		100,89	99,98	693,1	68,7	



Obr. 45: Pevnost betonu v tlaku



Obr. 46: Nárůst pevností v tlaku referenčních vzorků

5 Závěr

V předložené diplomové práci byl sledován vliv síranové koroze na beton. Nejdříve byly zjištěny mechanické a fyzikální vlastnosti připravených betonů. Betony byly vystaveny agresivnímu prostředí a byly sledovány změny, které proběhly ve složení betonu. Tyto změny byly sledovány pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie a termální analýzy. Na vzorcích vystavených síranové korozi byly také zjištěny jejich mechanické vlastnosti – pevnost betonu v tlaku a dynamický modul pružnosti.

Betonové vzorky byly síranové korozi vystaveny pouze poměrně krátkou dobu při konstantní laboratorní teplotě. Za tuto dobu došlo patrně pouze ke vzniku sádrovce, k jehož tvorbě není zapotřebí dlouhé časové období ani specifické podmínky.

Z výsledků chemické analýzy vyplývá vliv koncentrace SO_4^{2-} iontů v prostředí, kterému je beton vystaven. S vyšším obsahem těchto iontů dochází k výraznější degradaci betonu, v jeho složení se zvyšuje podíl síry. Patrný je také vliv doby trvání síranové koroze. S narůstajícím časem dochází k větší degradaci betonu a k výraznějším přeměnám ve složení betonu. Koroze potom také postupuje do větší hloubky. Tyto výsledky se potvrdily u všech tříd připravených betonů.

Zjištěn byl také vliv síranové koroze na pevnost betonu v tlaku a jeho dynamický modul pružnosti. Čím delší časové období a čím vyšší koncentraci síranových iontů byly betonové zkušební vzorky vystaveny, tím docházelo k většímu poklesu těchto mechanických vlastností.

6 Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu dplomové práce Ing. Pavlu Mecovi za ochotu a pomoc se zpracováním práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Martině Turicové za pomoc s chemickou analýzou vzorků pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie a Národnímu programu udržitelnosti č. LO1406 za možnost provedení termální analýzy. Dále bych vyjádřil dík všem pracovníkům laboratoře stavebních hmot FAST VŠB – TUO, zejména pak Ing. Janu Hurtovi za pomoc při experimentálním zkoušení mechanických vlastností vzorků.

7 Literatura:

- [1] JAN SKALNY, Jacques Marchand and Ivan Odler. *Sulfate attack on concrete*. [Online-Ausg.]. London: Spon, 2002. ISBN 0203342240.
- [2] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 9788087093757.
- [3] ČSN EN 206: *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*, Český normalizační institut, Praha 2014.
- [4] ČSN EN 12 620+A1: *Kamenivo do betonu*, Český normalizační institut, 2008
- [5] HEIDELBERG CEMENT GROUP. *Příručka technologa - beton: suroviny - výroba - vlastnosti*. 1. vyd. 2010.
- [6] KHESTL, Filip. VŠB - TUO. *Zkoušení stavebních hmot a výrobků: Keramika* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=cihly_zkouseni
- [7] MEC, Pavel. *Modelování pórovitých stavebních materiálů metodou konečných prvků*. Ostrava, 2012. Diplomová práce. VŠB-TUO.
- [8] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. Učebnice (VUTIUM). ISBN 8021416475.
- [9] UNČÍK, Stanislav a Patrik ŠEVČÍK. *Modul pružnosti betonu*. [online]. Vydal Betón Ráció, Trnava 2008 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: http://www.betonracion.sk/betonracion/downloads/modul_pruznosti.pdf
- [10] ČSN 73 1315: *Stanovení objemové hmotnosti, hustoty, hutnosti a pórovitosti betonu*, Český normalizační institut, 1989
- [11] ČSN EN 12390-7: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*, Český normalizační institut, 2009
- [12] ČSN 72 1155: *Stanovení nasákavosti a zdánlivé pórovitosti přírodního stavebního kamene*, Úřad pro normalizaci a měření, 1983
- [13] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9
- [14] MATOUŠEK, Milan a Rostislav DROCHYTKA. *Atmosférická koroze betonů*. Vyd. 1. Praha: IKAS, 1998, 171 s. ISBN 80-902558-0-9.

- [15] KURKOVÁ, Zuzana a ŽÍDEK Libor. *Návody do cvičení z laboratoří stavebních hmot*. Ostrava: FAST VŠB – TU Ostrava, 2005, 45 s.
- [16] MEHTA, P a Paulo J MONTEIRO. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 3rd ed. /. New York: McGraw-Hill, c2006, xxi, 659 p. ISBN 0071462899.

8 Seznam tabulek:

Tab. 1: Množství SO_4^{2-} pro jednotlivé třídy agresivního prostředí dle normy ČSN EN 206...	15
Tab. 2: Navržené složení betonových záměsí	17
Tab. 3 Stanovení objemové hmotnosti gravimetricky	23
Tab. 4 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením	25
Tab. 5: Stanovení zdánlivé pórovitosti.....	28
Tab. 6: Stanovení zdánlivé hustoty	29
Tab. 7: Stanovení nasákavosti vzorků.....	31
Tab. 8: Stanovení pevnosti v tlaku betonu	33
Tab. 9: Dynamický modul pružnosti.....	35
Tab. 10: Stanovení měrné hmotnosti.....	38
Tab. 11: Vypočtená skutečná pórovitost	39
Tab. 12: Změřené pH a přidané množství kyseliny sírové v čase – prostředí XA1	41
Tab. 13: Změřené pH a přidané množství kyseliny sírové v čase – prostředí XA2	42
Tab. 14: Změřené pH a přidané množství kyseliny sírové v čase – prostředí XA3	43
Tab. 15: Obsah síry určený ve vzorku pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie	45
Tab. 16: Zjištěný obsah $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ v cementové pastě degradované síranovou korozí	57
Tab. 17: Zjištěný obsah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v cementové pastě degradované síranovou korozí	59
Tab. 18: Zjištěný obsah CaCO_3 v cementové pastě degradované síranovou korozí.....	60
Tab. 19: Zjištěný obsah CaCO_3 v cementové pastě degradované síranovou korozí.....	61
Tab. 20: Změřené pH a množství přidané kyseliny sírové.....	63
Tab. 21: Zjištěný maximální možný příjem $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ do cementové pasty	65
Tab. 22: Pevnost betonu v tlaku	70

9 Seznam obrázků:

Obr. 1: Zkušební lis používaný k určení pevnosti v tlaku.....	20
Obr. 2: Otevřený mlýn naplněný nadrceným kamenivem a uzavřený mlýn připravený k mletí.....	21
Obr. 3: Pyknometr se zátkou	22
Obr. 4: Zobrazení objemové hmotnosti jednotlivých záměsí určené gravimetricky	24

Obr. 5: Objemová hmotnost jednotlivých záměsí určená hydrostatickým vážením.....	25
Obr. 6: Zkušební těleso vážené pod vodou na hydrostatických vahách.....	26
Obr. 7: Srovnání objemových hmotností určených gravimetricky a vážením na hydrostatických vahách.....	26
Obr. 8: Zdánlivá pórovitost jednotlivých záměsí.....	28
Obr. 9: Zdánlivá hustota jednotlivých záměsí.....	30
Obr. 10: Nasákavost jednotlivých záměsí.....	31
Obr. 11: Srovnání pevnosti v tlaku jednotlivých záměsí.....	33
Obr. 12: Přístroj používaný ke zjištění dynamického modulu pružnosti Proceq Tico.....	34
Obr. 13: Srovnání dynamického modulu pružnosti vodou nasyceného a vysušeného betonu	37
Obr. 14: Porovnání zdánlivé hustoty a měrné hmotnosti.....	39
Obr. 15: Porovnání zdánlivé a skutečné pórovitosti.....	40
Obr. 16: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C80/95 vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 30 dnech.....	47
Obr. 17: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C80/95 vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 60 dnech.....	47
Obr. 18: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 30 dnech.....	48
Obr. 19: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 60 dnech.....	48
Obr. 20: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 s příměsí mletého vápence vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 30 dnech.....	49
Obr. 21: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 s příměsí mletého vápence vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 60 dnech.....	49
Obr. 22: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 s příměsí popílku vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 30 dnech.....	50
Obr. 23: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 s příměsí popílku vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 60 dnech.....	50
Obr. 24: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 s příměsí mleté granulované vysokopecní strusky vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 30 dnech.....	51
Obr. 25: Obsah síry ve vzorcích betonu třídy C30/37 s příměsí mleté granulované vysokopecní strusky vystavených jednotlivým agresivním prostředím po 60 dnech.....	51

Obr. 26: Rozdíl obsahu síry u jednotlivých tříd betonu v závislosti na hloubce odběru vzorku uložených v prostředí XA1 30 dnů	52
Obr. 27: Rozdíl obsahu síry u jednotlivých tříd betonu v závislosti na hloubce odběru vzorku uložených v prostředí XA1 60 dnů	52
Obr. 28: Rozdíl obsahu síry u jednotlivých tříd betonu v závislosti na hloubce odběru vzorku uložených v prostředí XA2 30 dnů	53
Obr. 29: Rozdíl obsahu síry u jednotlivých tříd betonu v závislosti na hloubce odběru vzorku uložených v prostředí XA2 60 dnů	53
Obr. 30: Rozdíl obsahu síry u jednotlivých tříd betonu v závislosti na hloubce odběru vzorku uložených v prostředí XA3 30 dnů	54
Obr. 31: Rozdíl obsahu síry u jednotlivých tříd betonu v závislosti na hloubce odběru vzorku uložených v prostředí XA3 60 dnů	54
Obr. 32: Ukázka výstupu z termální analýzy	56
Obr. 33: Zjištěný obsah $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ v cementové pastě degradované síranovou korozí	58
Obr. 34: Zjištěný obsah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v cementové pastě degradované síranovou korozí	59
Obr. 35: Zjištěný obsah CaCO_3 v cementové pastě degradované síranovou korozí	60
Obr. 36: Zjištěný obsah S [%] v cementové pastě degradované síranovou korozí	62
Obr. 37: Zjištěný obsah S [%] v cementové pastě degradované síranovou korozí	62
Obr. 38: Ukázka výstupu z termální analýzy	64
Obr. 39: Maximální možný příjem síranů jednotlivých typů betonů	65
Obr. 40: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase u betonu třídy C80/95 v závislosti na prostředí uložení	66
Obr. 41: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase u betonu třídy C30/37 v závislosti na prostředí uložení	67
Obr. 42: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase u betonu třídy C30/37 s příměsí mletého vápence v závislosti na prostředí uložení	67
Obr. 43: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase u betonu třídy C30/37 s příměsí popílku v závislosti na prostředí uložení	68
Obr. 44: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase u betonu třídy C30/37 s příměsí mleté vysokopecní granulované strusky v závislosti na prostředí uložení	68
Obr. 45: Pevnost betonu v tlaku	71
Obr. 46: Nárůst pevností v tlaku referenčních vzorků	71

10 Seznam příloh:

- Příloha č. 1: Rentgenová fluorescenční spektrometrie – naměřená data – betonové vzorky
- Příloha č. 2: Rozdíl obsahu síry po 30 a 60 dnech ve vzorcích betonu jednotlivých tříd vystavených agresivnímu prostředí
- Příloha č. 3: Výstup z termální analýzy vzorků cementové pasty vystavených agresivnímu prostředí
- Příloha č. 4: Rentgenová fluorescenční spektrometrie – naměřená data – vzorky cementové pasty
- Příloha č. 5: Výstup z termální analýzy vzorků cementové pasty – maximální možný příjem síranů
- Příloha č. 6: Dynamický modul pružnosti – naměřená data